

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Davor Radanić**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentori:

doc.dr.sc. Damir Godec

Student:

Davor Radanić

Zagreb, 2015.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Damiru Godecu te gosp. Miodragu Kataleniću na pomoći i savjetima prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem svojim kolegama, prijateljima i obitelji koji su mi pružali podršku tijekom čitavog studija.*

Davor Radanić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum <b>25-02-2015</b> Prilog
Klasa: <b>602-04/15-6/3</b>
Ur.broj: <b>15-7703-15-73</b>

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DAVOR RADANIĆ**

Mat. br.: 0035180043

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ PARAMETARA NISKOBUDŽETNOG 3D PRINTANJA NA PRIONJIVOST MODELA NA RADNU PODLOGU**  
Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF LOW BUDGET 3D PRINTING PARAMETERS ON MODEL ADHESIVENESS ON WORKING PLATFORM**  
Opis zadatka:

Aditivne tehnologije sve su više prisutne ne samo u projektima razvoja novih proizvoda, već i u svakodnevnom životu šire populacije. Tome je uvelike pridonijela pojava tzv. niskobudžetnih 3D printera koji su svojom cijenom i dimenzijama dostupni gotovo svakome. Većina niskobudžetnih 3D printera temelji se na tehnologiji taložnog očvršćivanja (e. Fused Deposition Modeling – FDM), gdje se modeli, prototipovi i/ili konačni proizvodi prave od materijala u obliku žice koja se tali i nanosi (taloži) na točno određenim mjestima radnog sloja. FDM tehnologija osim svojih prednosti ima i određene nedostatke u usporedbi s drugim aditivnim ili klasičnim tehnologijama proizvodnje polimernih proizvoda. Jedan od nedostataka je i smanjena prionjivost modela na radnu podlogu u uglovima pretežito većih, pravokutnih oblika proizvoda. Rezultat tog nedostatka je djelomično podizanje proizvoda od radne podloge tijekom izrade proizvoda, što uzrokuje dimenzijsku netočnost i netočnost oblika proizvoda na tom detalju.

U radu je potrebno detaljno opisati FDM postupak i trenutačno na tržištu raspoloživu opremu i materijale za taj postupak. U eksperimentalnom dijelu, potrebno je analizirati utjecaj podesivih parametara niskobudžetnog 3D printanja na prionjivost modela referentne geometrije na radnu podlogu 3D printera.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Damir Godec

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
SAŽETAK.....	IV
1.) UVOD .....	1
2.) ADITIVNA PROIZVODNJA.....	2
3.) VRSTE ADITIVNIH TEHNOLOGIJA:.....	3
3.1 Stereolitografija (SLA) .....	3
3.2 PolyJet postupak .....	4
3.3 Selektivno lasersko očvršćivanje (SLS) .....	5
3.4 3D tiskanje .....	6
3.5 Proizvodnja lamilarnih objekata (LOM) .....	7
4.) TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE .....	8
4.1 Postupak taložnog očvršćivanja: .....	9
4.1.1 Zagrijavanje.....	9
4.1.2 Ekstrudiranje .....	10
4.1.3 Hlađenje .....	12
4.1.4 Potporna struktura i naknadna obrada .....	12
5.) UREĐAJI .....	13
5.1 3D Systems .....	13
5.2 MakerBot .....	15
5.3 Ultimaker .....	17
5.4 Solidoodle .....	18
5.5 Stratasys.....	20
5.6 Ostali.....	22
6.) MATERIJALI .....	24
7.) PRIONJIVOST MODELA NA RADNU PODLOGU .....	27

7.1	Veći model.....	28
7.2	Manji model.....	34
8.)	ZAKLJIČAK.....	37
9.)	LITERATURA.....	38
10.)	PRILOZI.....	39

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Postupak izrade dijela aditivnom tehnologijom [2] .....	2
Slika 3.1 Postupak stereolitografije [4] .....	3
Slika 3.2 Polyjet postupak [1] .....	4
Slika 3.3 Postupak selektivnog laserskog srašćivanja [5] .....	5
Slika 3.4 3D tiskanje [4].....	6
Slika 3.5 LOM postupak [4].....	7
Slika 4.1 Postupak taložnog očvršćivanja [4] .....	8
Slika 4.2 Glava ekstrudera [4].....	9
Slika 4.3 Različite strukture popunjavanja unutrašnjosti prototipa [10].....	11
Slika 5.1 Cube 3 [12].....	14
Slika 5.2 Makerbot Replicator Mini [13] .....	15
Slika 5.3 Ultimaker 2, Ultimaker 2 GO i Ultimaker 2 Extended [14] .....	18
Slika 5.4 Solidoodle 4 [15].....	19
Slika 5.5 Stratasy Mojo [16].....	21
Slika 5.6 da vinci 1.0 [18] .....	22
Slika 6.1 PC aparat za tople napitke [1] .....	25
Slika 6.2 PPSF kućište zupčanika [1].....	26
Slika 7.1 Makerbot Replicator 2X [13] .....	27
Slika 7.2 model.....	28
Slika 7.3 Izradak.....	28
Slika 7.4 Nepravilnosti prilikom nanošenja materijala .....	29
Slika 7.5 Početak odvajanja prvog izratka od radne podloge (slikano s lijeve strane uređaja) ....	30
Slika 7.6 Nepravilnosti u stražnjem lijevom kutu pri izradi prvog sloja.....	30
Slika 7.7 Početak odvajanja modela od radne podloge pri 105°C .....	31
Slika 7.8 Odvajanje modela od podloge prilikom 3. printanja.....	31
Slika 7.9 Izradak isprintan pri temperaturi radne podloge od 115°C.....	32
Slika 7.10 Odljepljivanje modela pri temperaturi radne podloge od 120°C .....	32
Slika 7.11 Razvlačenje niti materijala pri temperaturi radne podloge od 150°C .....	33
Slika 7.12 Novi model manjih dimenzija.....	34
Slika 7.13 Razvlačenje niti materijala na desnom modelu.....	35
Slika 7.14 Razlike u temperaturi na pojedinim djelovima radne podloge .....	35
Slika 7.15 Razlike u temperaturi na pojedinim djelovima radne podloge .....	36

**SAŽETAK**

U okviru završnog rada je napravljen pregled tehnologija aditivne proizvodnje te je detaljno opisan postupak taložnog očvršćivanja materijala. Nadalje napravljen je pregled uređaja koji se trenutno nalaze na tržištu te su navedena njihova osnovna svojstva. U radu se nalazi i pregled osnovnih materijala koji se koriste pri taložnom očvršćivanju. Također je ispitan i opisan utjecaj parametara niskobudžetnog 3D printanja na prionjivost modela na radnu podlogu.



## 1.) UVOD

Aditivna proizvodnja služi za izradu modela, prototipova, dijelova kalupa, alata i gotovih tvorevina u kratkom vremenu. Suvremeno tržište zahtijeva sve veće smanjenje vremena izrade što je omogućilo nagli razvoj i usavršavanje aditivnih tehnologija. Aditivni postupci ne zahtijevaju izradu kalupa ili posebnu opremu za rad s materijalima, a zbog izrade modela slaganjem sloj po sloj, ne predstavlja im problem izraditi tvorevinu izrazito komplicirane geometrije. Aditivna proizvodnja i tvrtke koje se njome bave su u značajnom porastu te se aditivna proizvodnja smatra jednom od najbrže rastućih grana proizvodnje.

Pojavom niskobudžetnih 3D printera aditivne tehnologije postaju sve više prisutne ne samo u razvoju novih proizvoda, već i u svakodnevnom životu šire populacije. Većina niskobudžetnih 3D printera temelji se na tehnologiji taložnog očvršćivanja (e. *Fused Deposition Modeling – FDM*), gdje se materijal u obliku žice tali i nanosi na radnu podlogu. FDM tehnologija osim svojih prednosti ima i određene nedostatke u usporedbi s drugim aditivnim ili klasičnim tehnologijama proizvodnje polimernih proizvoda. Jedan od nedostataka je i smanjena prionjivost modela na radnu podlogu u uglovima pretežito većih, pravokutnih oblika proizvoda, što uzrokuje dimenzijsku netočnost i netočnost oblika proizvoda na tom detalju. Utjecaj parametara na prionjivost modela na radnu podlogu će biti ispitan u praktičnom dijelu rada, gdje će se pravokutni model izrađivati pri različitim parametrima.

## 2.) ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (često zvana 3D printanje ili brza izrada prototipova) je naziv za skup tehnologija kojima se omogućava izrada trodimenzionalnih objekata direktno iz CAD modela. Za razliku od konvencionalnih obrada, gdje se konačni oblik dobiva skidanjem materijala sa sirovca, prilikom aditivne proizvodnje objekti se izrađuju slaganjem slojeva materijala jednakih debljina jedan na drugi. Ti objekti mogu biti gotovo bilo kojeg oblika i geometrije, te se može upotrijebljivati veliki izbor materijala.

Proizvodnja dijela započinje izradom CAD modela. Jednom kada je CAD model gotov generira se STL (*e. Standard Tessellation Language*) datoteka koja se potom prebacuje na uređaj. STL datoteka prikazuje predmet kao mrežu povezanih trokuta. Osim STL datoteke može se upotrijebiti i AMF datoteka (*e. Additive Manufacturing File*). AMF datoteka prikazuje jedan ili više objekata raspoređenih u vektore, također se kod AMF datoteka može dodati opis materijala i boje. Nakon generiranja STL datoteke slijedi podešavanje parametara, jednom kada su parametri podešeni može započeti izrada. Uređaj očitava STL datoteku te slaže sloj po sloj kapljevito, praškasto, lističasto ili nekog drugog oblika materijala kako bi se u konačnici dobio trodimenzionalni objekt. Kada je izrada završena, gotova tvorevina se vadi iz uređaja, te ukoliko je potrebno, radi se završna obrada. Prilikom vađenja potrebno je paziti da je temperatura radnog prostora dovoljno niska, kako bi se moglo sigurno rukovati tvorevinom. [1]



Slika 2.1. Postupak izrade dijela aditivnom tehnologijom [2]

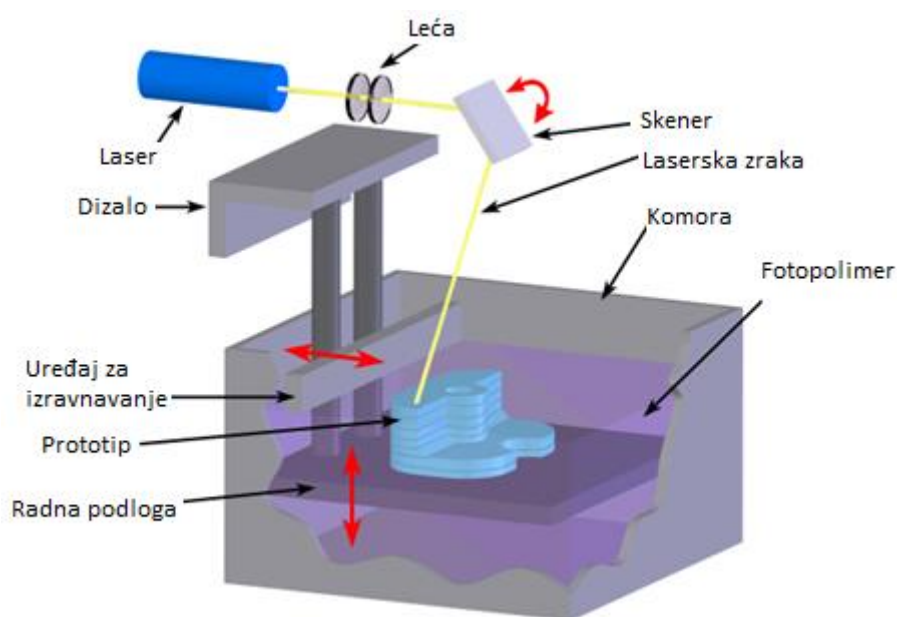
### 3.) VRSTE ADITIVNIH TEHNOLOGIJA:

Termin aditivna proizvodnja obuhvaća mnoge tehnologije, a osnovna podjela bi bila prema vrsti materijala koje upotrebljavaju.

- kapljeviti materijali (SLA, PolyJet)
- praškasti materijali (SLS, 3D tiskanje)
- čvrsti materijali (FDM, LOM) [1]

#### 3.1 Stereolitografija (SLA)

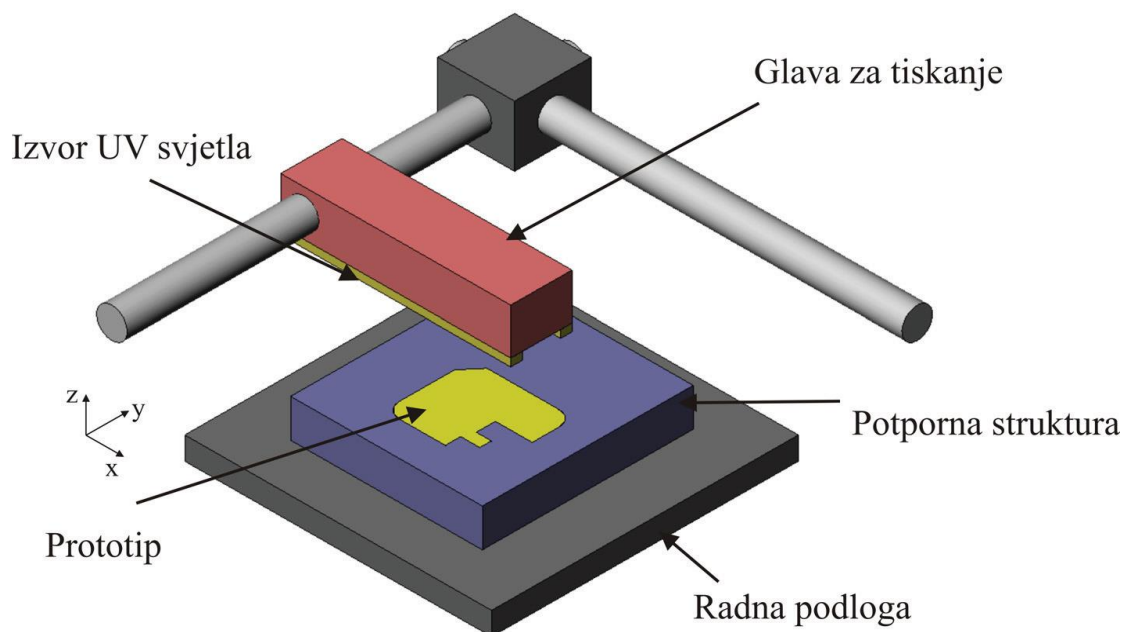
Stereolitografija je postupak prilikom kojeg se koristi fotopolimer koji se skrućuje kada je izložen izvoru svjetlosti. Radna podloga koja se nalazi u komori se spušta za debljinu sloja, dok laser generira i fokusira UV svjetlost i skenira sloj polimera koji očvršćuje. Nakon toga se podloga spušta za debljinu novog sloja. Uređaj za izravnavanje služi kako bi se izbjegla pojava mjehurića zraka. Postupak se ponavlja dok se ne dobije konačni oblik. Materijali koji se najčešće koriste za SLA postupak su: akrilni poli (metil-metakrilat) PMMA poznatiji kao pleksiglas i epoksidna smola EP. Kod stereolitografije se još upotrebljavaju: polietilen visoke gustoće (PE-HD), polipropilen (PP), poliamid 66 (PA66), polikarbonat (PC), poli(butilen-tereftalat) (PBT) te akrilonitril/butadien/stiren (ABS). [1,3]



Slika 3.1 Postupak stereolitografije [4]

### 3.2 PolyJet postupak

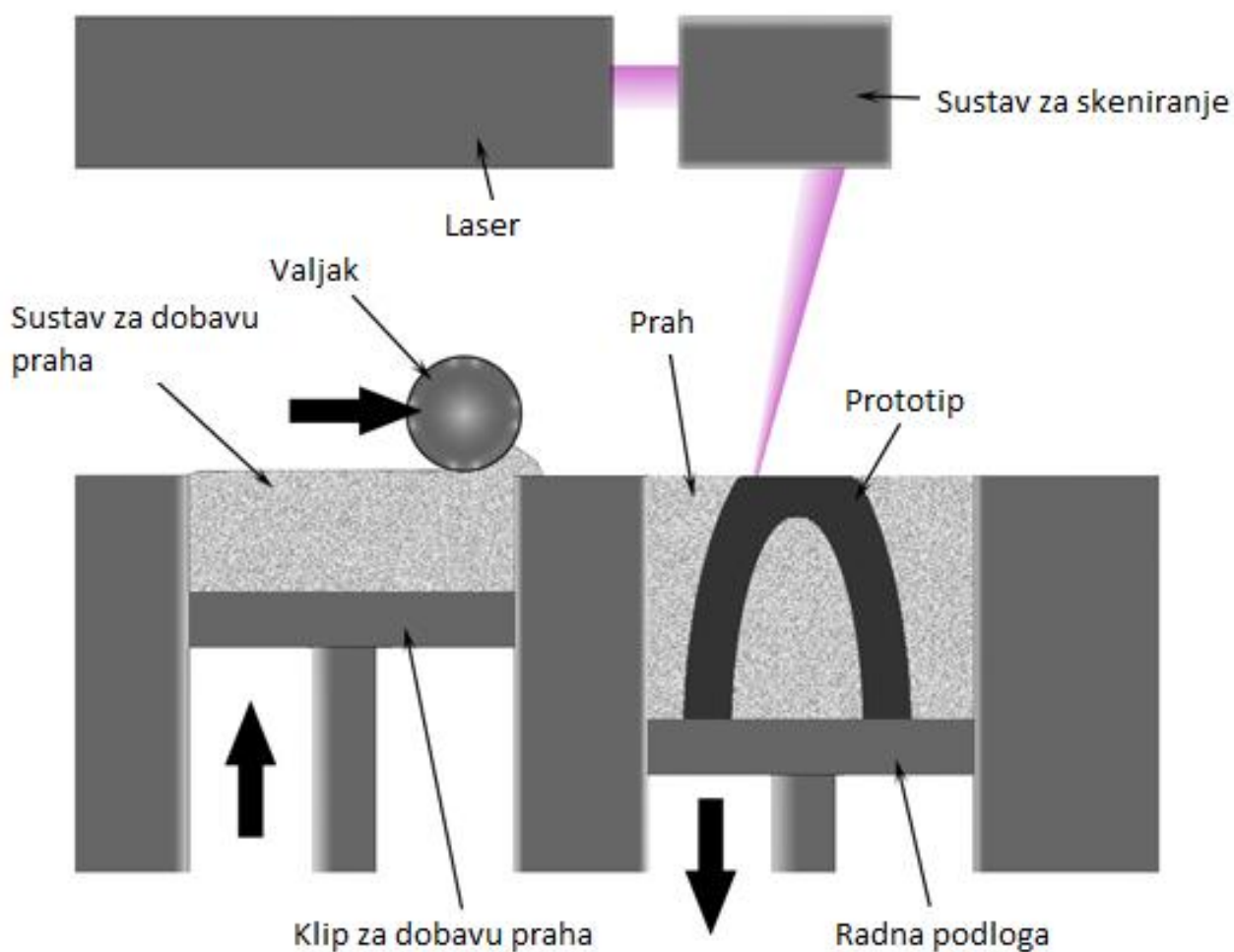
PolyJet je tehnologija aditivne proizvodnje koja koristi kapljevite materijale. Nastala je 2000. godine sjedinjenjem dobrih strana stereolitografije i 3D tiskanja. Mreža mlaznica kliže naprijed- nazad i nanosi sloj fotoosjetljivog polimernog materijala na radnu podlogu, debljine 16  $\mu\text{m}$ , što je 1/5 debljine stereolitografskog sloja. Nakon dovršetka jednog sloja, radna podloga se spušta za debljinu drugog radnog sloja. Kao i kod stereolitografije očvršćivanje polimera se odvija uslijed djelovanja UV svjetlosti. Svaki sloj očvršćuje odmah nakon tiskanja te na taj način nastaje potpuno umrežen prototip. Primjenjuju se dva različita materijala: jedan za model, drugi za potporna struktura. Nakon završetka izrade prototipa, potporna struktura se uklanja ručno ili pod djelovanjem mlaza vode pod visokim tlakom. Materijali koji se najčešće upotrebljavaju za PolyJet postupak su FullCure fotopolimerni akrilni materijali koji omogućavaju izradu modela visoke preciznosti. [1]



Slika 3.2 Polyjet postupak [1]

### 3.3 Selektivno lasersko očvršćivanje (SLS)

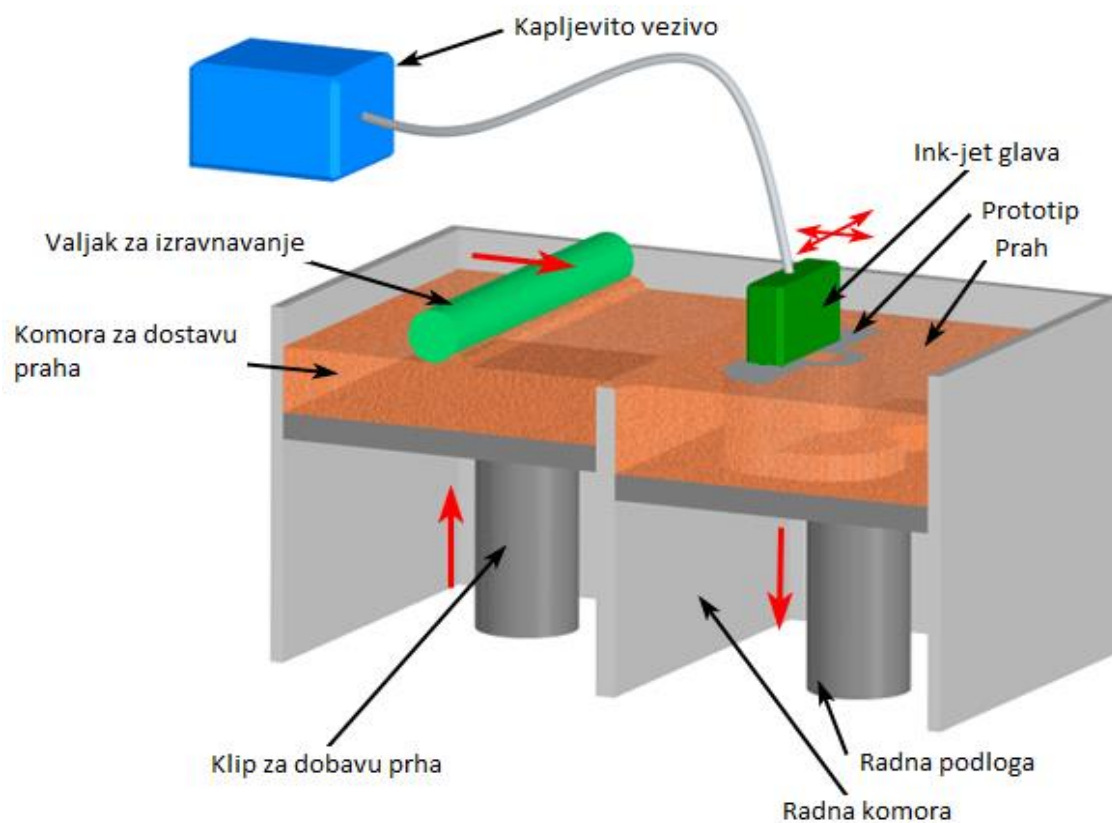
Selektivno lasersko očvršćivanje je postupak izrade prototipova prilikom kojeg se koristi laser kako bi se očvrstnuo praškasti materijal. Postupak se odvija u temperiranoj komori ispunjenoj inertnim plinom, kako bi se izbjegla oksidacija površine i potencijalno izgaranje čestica praškastog materijala. Praškasti materijal se nanosi iz komore pomoću valjka ili ravne ploče za izravnavanje. Prah se održava na temperaturi malo ispod tališta. Prah se skenira i grije CO<sub>2</sub> laserom te dolazi do međusobnog sraščivanja čestica materijala. Započinje se s donjim presjekom. Kada je prvi sloj završen, radna podloga se spušta za debljinu novog sloja koji nakon toga nanosi. Kod SLS-a nije potrebna potporna struktura, jer je komora popunjena neobrađenim prahom. Postupak je prvotno zamišljen za izradu polimernih prototipova, ali se mogu koristiti i metalni i keramički materijali. [1,5]



Slika 3.3 Postupak selektivnog laserskog sraščivanja [5]

### 3.4 3D tiskanje

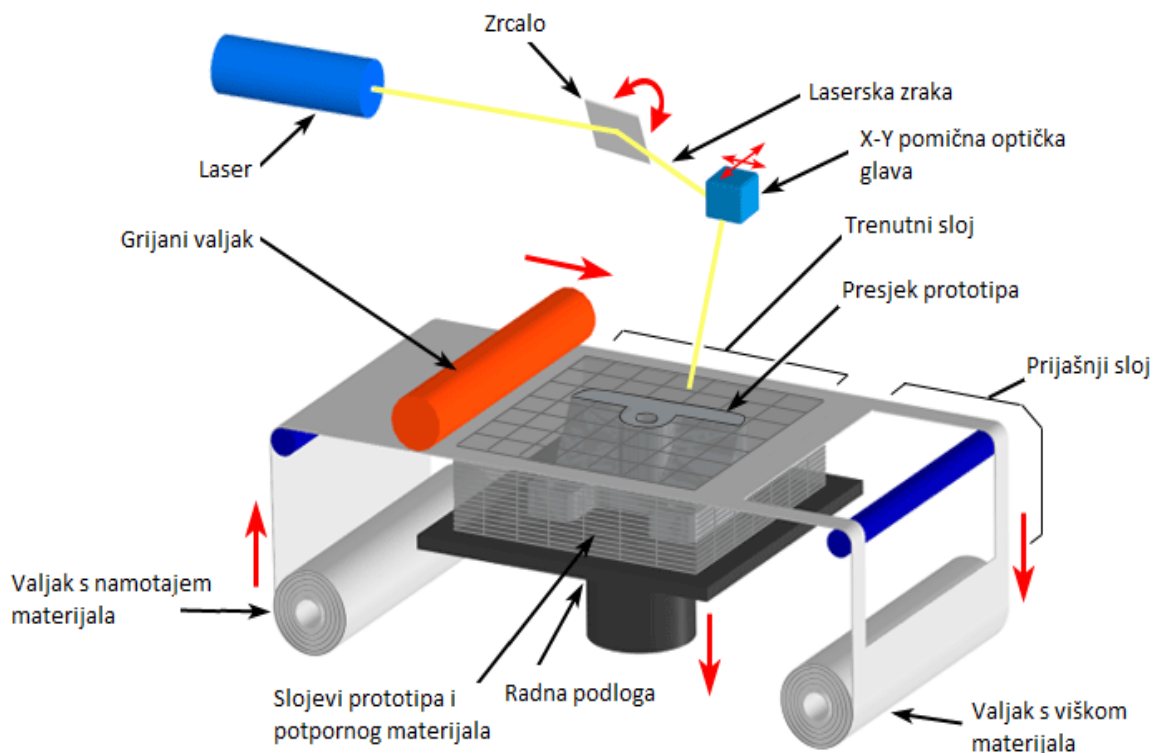
3D tiskanje je postupak aditivne proizvodnje, gdje se materijal u obliku praha selektivno veže raspršivanjem kapljevito vezivo. Načelo rada je slično načelu rada klasičnih pisača, samo što umjesto boje, mlaznice izbacuju vezivo, uslijed čega dolazi do skrućivanja praškastog materijala. Vezivo se nanosi pomoću inkjet mlaznica. Izrada započinje s donjim presjekom te se nakon završetka jednog sloja radna podloga spušta za debljinu drugog, nakon čega se ponovno nanosi praškasti materijal. Značajna prednost ovog postupka je u tome što je moguća izrada prototipova u boji. Materijali koji se najčešće koriste su kompoziti s metalnom matricom, nikal, poliuretan visoke čvrstoće i savitljivosti. [1,6]



Slika 3.4 3D tiskanje [4]

### 3.5 Proizvodnja lamilarnih objekata (LOM)

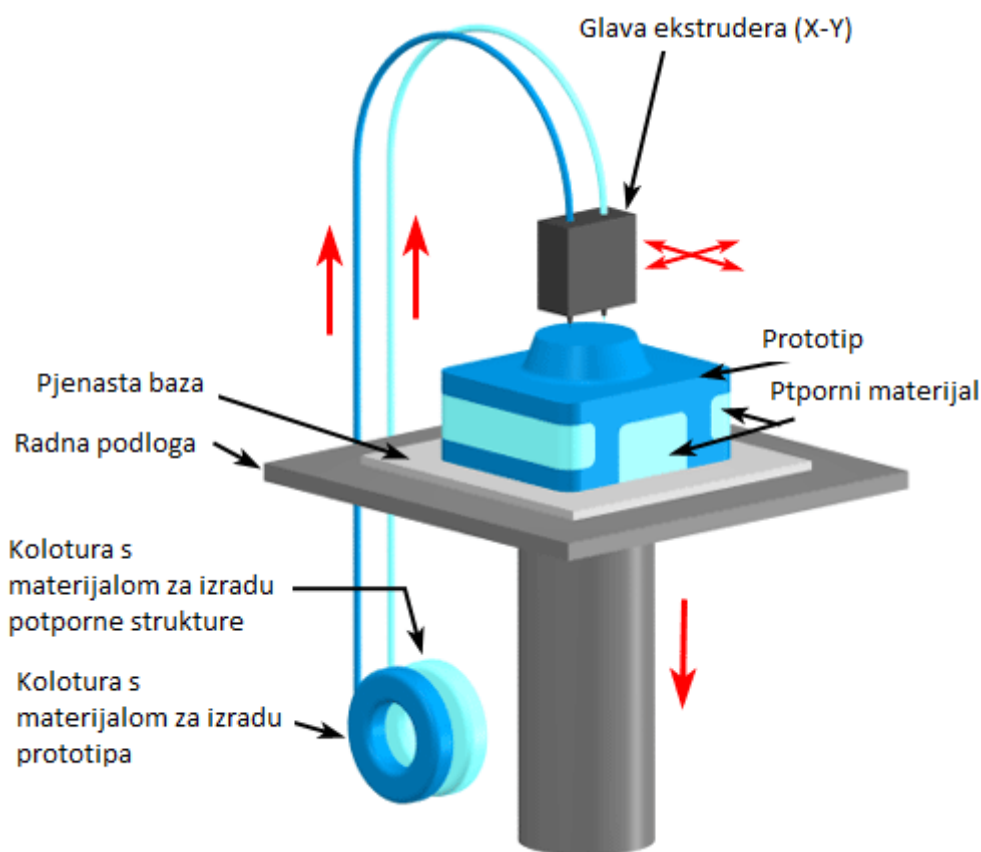
Proizvodnja lamilarnih objekata je proces aditivne tehnologije, gdje se model gradi polaganjem i lijepljenjem (zavarivanjem) materijala u obliku filmova, folija, limova, ploča. Ovaj proces je hibrid između dodavanja i odvajanja materijala na način da se model gradi dodavanjem slojeva po z osi, koji se režu u obliku poprečnih presjeka prema konturama modela u x-y ravнини. Materijal se dobavlja pomoću valjka na jednoj strani stroja i odmotava do druge strane. Materijal može biti u obliku papira, polimernog filma ili folije, metalnih/keramičkih ploča ili kompozita s epoksidnom matricom i staklenim ojačalima. [1,6]



Slika 3.5 LOM postupak [4]

#### 4.) TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE

Najrasprostranjeniji postupak aditivne proizvodnje je postupak taložnog očvršćivanja. Postupak je izvorno razvijen u tvrtci *Advanced Ceramics Research*, SAD, ali ga je značajno poboljšala tvrtka *Stratasys*, SAD čijem je osnivaču Scottu Crumpu pripao patent.[1,2] Postupak taložnog očvršćivanja koristi grijaču komoru, kako bi rastalio polimer kojeg se dobavlja u sustav u obliku žice ili voska. Nit se dobavlja u komoru pomoću nazubljenih vodilica koji stvaraju pritisak pomoću kojeg se odvija ekstrudiranje.[2] Mlaznica se giba po horizontalnoj ravni stvarajući tako konturu sloja. Kada je jedan sloj gotov kao i kod drugih postupaka i ovdje se pomiče radna ploha za željenu dubinu te se proces ponavlja.[7]



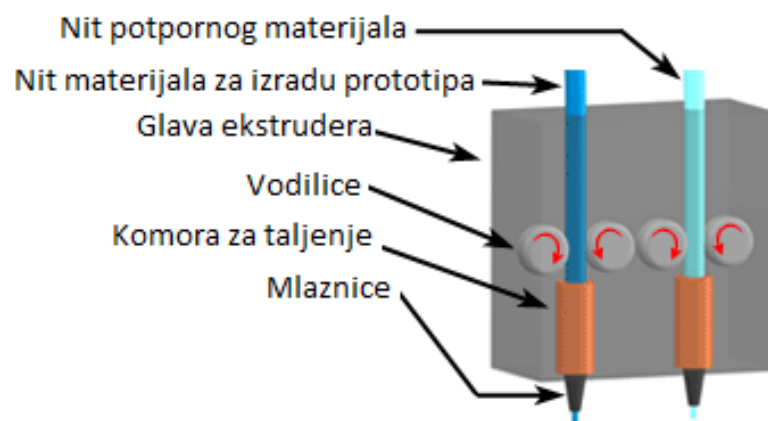
Slika 4.1 Postupak taložnog očvršćivanja [4]



## 4.1 Postupak taložnog očvršćivanja:

Postupak taložnog očvršćivanja započinje izradom 3D CAD modela koji se prebacuje u STL datoteku. STL datoteka se „reže“ odnosno računalnim programom dijeli u vodoravne slojeve.[1]

Pošto se kod taložnog očvršćivanja radi o ekstrudiranju materijala, potrebna je konstantna dobava odakle bi se materijal uzimao. Prilikom ovog postupka materijal se u mlaznicu dobavlja u obliku žice ili voska kao kontinuirana nit. Nit se dobavlja u komoru za taljenje pomoću nazubljenih vodicica koje povlače nit s koloture na kojoj se materijal nalazi i potiskuju u mlaznicu. Vodicice služe i kako bi se ostvario pritisak za ekstrudiranje rastaljenog materijala.[2]



Slika 4.2 Glava ekstrudera [4]

### 4.1.1 Zagrijavanje

U mlaznici se materijal zagrijava pomoću grijaćih tijela na temperaturu malo iznad temperature tališta. Materijal u mlaznici mora biti u rastaljenom stanju, ali isto tako mora biti što bliže temperaturi očvršćivanja, kako nebi došlo do izgaranja ili razgradnje materijala u mlaznici koji bi ostavili ostatke polimera u njenoj unutrašnjosti, jer ih je kasnije teško ukloniti te bi onečistili taljevinu. Temperatura materijala također nebi trebala biti previsoka kako bi vrijeme skrućivanja nakon ekstrudiranja bilo što kraće [2]. Cijeli sustav je u temperiranoj okolini, pri temperaturi neposredno ispod temperature tališta materijala, te se time smanjuje potrošnja energije [1].

#### 4.1.2 Ekstrudiranje

Mlaznice se pomiču u x i y smjeru kreirajući pritom dvodimenzionalni sloj [8]. Nakon završetka izrade prvog sloja radna podloga se spušta za debljinu slijedećeg sloja te se proces ponavlja. Oblik i veličina niti koju se ekstrudira ovisi o mlaznici. Mlaznice velikog promjera omogućuju brži prolazak materijala, ali će rezultirati prototipom lošije kvalitete i preciznosti u usporedbi s originalnim CAD crtežom. Promjer mlaznice također određuje minimalnu debljinu dijelova prototipa. Ovaj proces je pogodniji za izradu prototipova čija je debljina stijenki i dijelova minimalno dvostruko veća od promjera mlaznice [2].

Volumni protok materija kroz mlaznicu se računa prema formuli:

$$Q = b \cdot h \cdot v \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (4.1)$$

gdje su:  $Q$  = volumni protok [ $m^3/s$ ],  $a$  = debljina sloja [m],  $b$  = širina [m],  $v$  = brzina mlaznice [m/s]

Dobava niti ovisi o volumnom protoku te se računa prema formuli:

$$H = F \times \frac{Q}{A_f} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (4.2)$$

gdje su:  $H$  = brzina dobave niti materijala [m/s],  $Q$  = volumni protok [ $m^3/s$ ],  $A_f$  = poprečni presjek niti [ $m^2$ ],  $F$  = faktor trenja između vodilica i niti

U idealnim uvjetima faktor trenja između vodilica i niti bi bio jednak jedinici ( $F=1$ ). U slučaju da je  $F>1$ , nit materijala će biti zdrobljena od strane vodilica, a u slučaju kada je  $F<1$ , nit materijala skliže između vodilica.

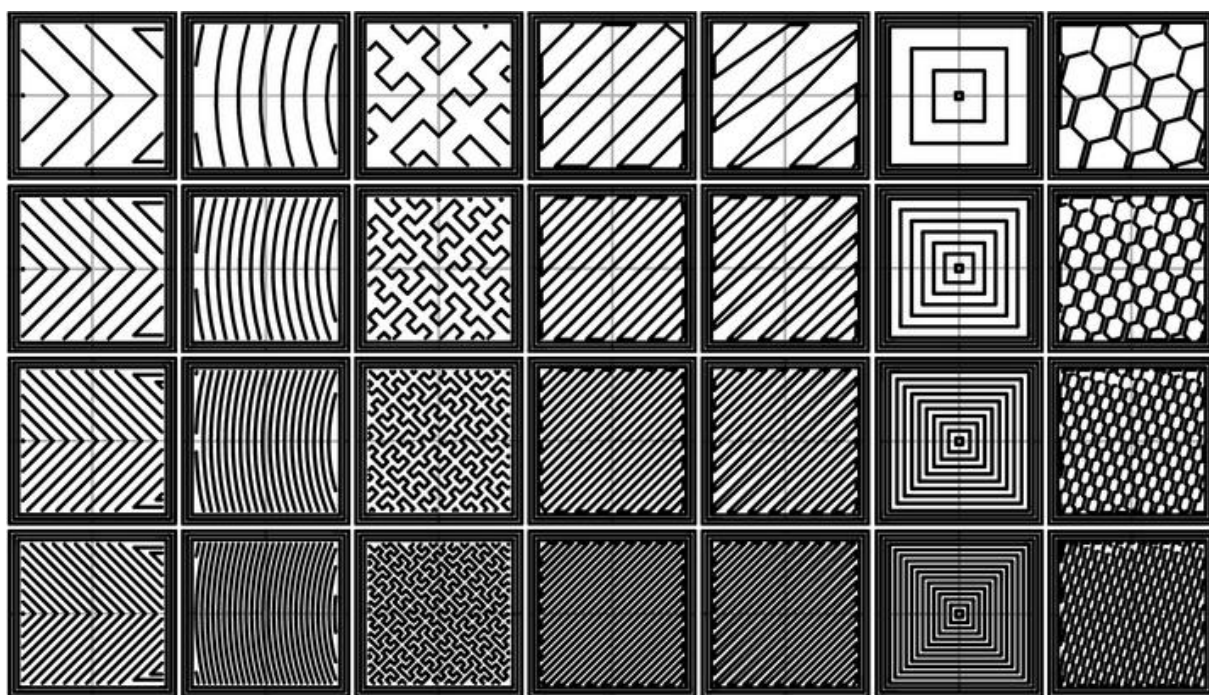
Brzina okretanja vodilica se računa prema formuli:

$$n = \frac{H}{2\pi r} [s^{-1}] \quad (4.3)$$

gdje su:  $n$  = brzina vodilica [ $s^{-1}$ ],  $H$  = brzina dobave niti materijala [m/s],  $r$  = polumjer vodilice [m]

Sve ranije navedena formule vrijede uz pretpostavku da je promjer niti materijala konstantan. Iz navedenih formula se može zaključiti da ukoliko se želi konstantnu dimenziju niti protok materijala se mora mijenjati sukladno promjeni brzine kretanja mlaznice.[2,9]

Tvorevinama se najprije izrađuje vanjska kontura, te zatim unutrašnjost. Pošto nagla promjena smjera kretanja mlaznice može uzrokovati poteškoće pri kontroli toka materijala, uobičajno je da se vanjske konture tvorevine izrađuju pri sporijim brzinama mlaznice, kako bi lakše osigurali konstantnu dobavu materijala. Unutrašnja struktura tvorevine se može izrađivati pri većim brzinama pošto je vanjska kontura potrebna da se osigura geometrijska točnost. Unutrašnjost tvorevine može biti popunjeno različitim strukturama: puna struktura, mrežasta struktura (krugovi, linije, pravokutnici), i optimalna struktura pčelinjih saća (šesterokutna struktura).[1,2,9]



Slika 4.3 Različite strukture popunjavanja unutrašnjosti prototipa [10]

### **4.1.3 Hlađenje**

Nakon ekstrudiranja, materijal se mora spojiti sa susjednim slojem materijala te očvrnuti. Kako bi se ostvarilo spajanje susjednih slojeva, nakon ekstrudiranja mora postojati dovoljna količina toplinske energije, kako bi se susjedne površine aktivirale te kako bi došlo do njihovog spajanja. Ukoliko je ta energija nedostatna, slojevi se mogu spojiti, ali kvaliteta između novog i starog sloja nebi zadovoljavala. Ovo može izazvati napuknuće na površini te bi se na tim mjestima materijal mogao lako razdvojiti. U slučaju prevelike količine toplinske energije može doći do razvodnjavanja ranije nanešenog materijala, što bi u konačnici izazvalo netočnost dimenzija tvorevine.[2]

Jednom kada je materijal ekstrudiran, idealno bi bilo kada bi ostao oblikom i veličinom nepromjenjen. Gravitacija te površinska napetost mogu izazvati promjenu oblika materijala dok veličina varira ovisno o uvjetima hlađenja i sušenja materijala. Ako je materijal ekstrudiran u obliku voska, može doći do skupljanja prilikom sušenja, a postoji i mogućnost poroznosti materijala. Ukoliko je materijal ekstrudiran u rastaljenom obliku, doći će do skupljanja uslijed hlađenja. Također je velika je vjerojatnost da će hlađenje bit nelinearno. Ukoliko je ta nelinearnost signifikantna, moguće je da će tvorevina biti izobličena nakon hlađenja. Ovaj problem se može minimizirati tako, da se osigura da temperaturna razlika između komore i okolne atmosfere bude što manja. Također treba osigurati da proces hlađenja bude kontroliran te da hlađenje bude sporo i postepeno.[2]

### **4.1.4 Potporna struktura i naknadna obrada**

Kod složenih geometrija obratka potrebno je upotrijebiti potpornu strukturu. U tom slučaju se upotrebljava dvostruka glava ekstrudera. U jednoj mlaznici se nalazi materijal za izradu tvorevine, a u drugoj materijal za podupiranje. Nakon što je prototip gotov, potporni materijal se uklanja. Najefikasniji način uklanjanja potpornog materijala se ostvaruje na način da se kao potporni materijal koristi različiti materijal od onoga od kojeg je napravljen prototip. Varijacije u svojstvima materijala se također trebaju iskoristiti, kako bi se potporni materijal lakše razlikovao od glavnog materijala, bilo to vizualno (korištenjem potpornog materijala druge boje), mehanički (korištenjem slabijeg materijala kao potporu) ili kemijski (korištenjem materijala za potporu koji je topljiv u vodenoj otopini).[1,2]

Zbog lošije kvalitete površine čak i nakon uklanjanja potporne strukture najčešće je potrebna dodatna obrada kako bi se postigla zadovoljavajuće kvaliteta površine.

## 5.) UREĐAJI

Broj prodanih uređaja za aditivnu proizvodnju znatno raste iz godine u godinu. Prema procjenama tvrtke Gartner, Inc. svjetska isporuka 3D printera u 2015. godini bi trebala premašiti 217 000 jedinica. To je znatno povećanje u odnosu na 2014. godinu kada svjetska isporuka 3D printera iznosila 108 150 jedinica. Procjenjuje se da će se u razdoblju između 2015. i 2018. godine svjetska isporuka 3D printera više nego udvostručavati svake godine, te da će u 2018. godini dostići vrijednost od 2,3 milijuna jedinica.[11]

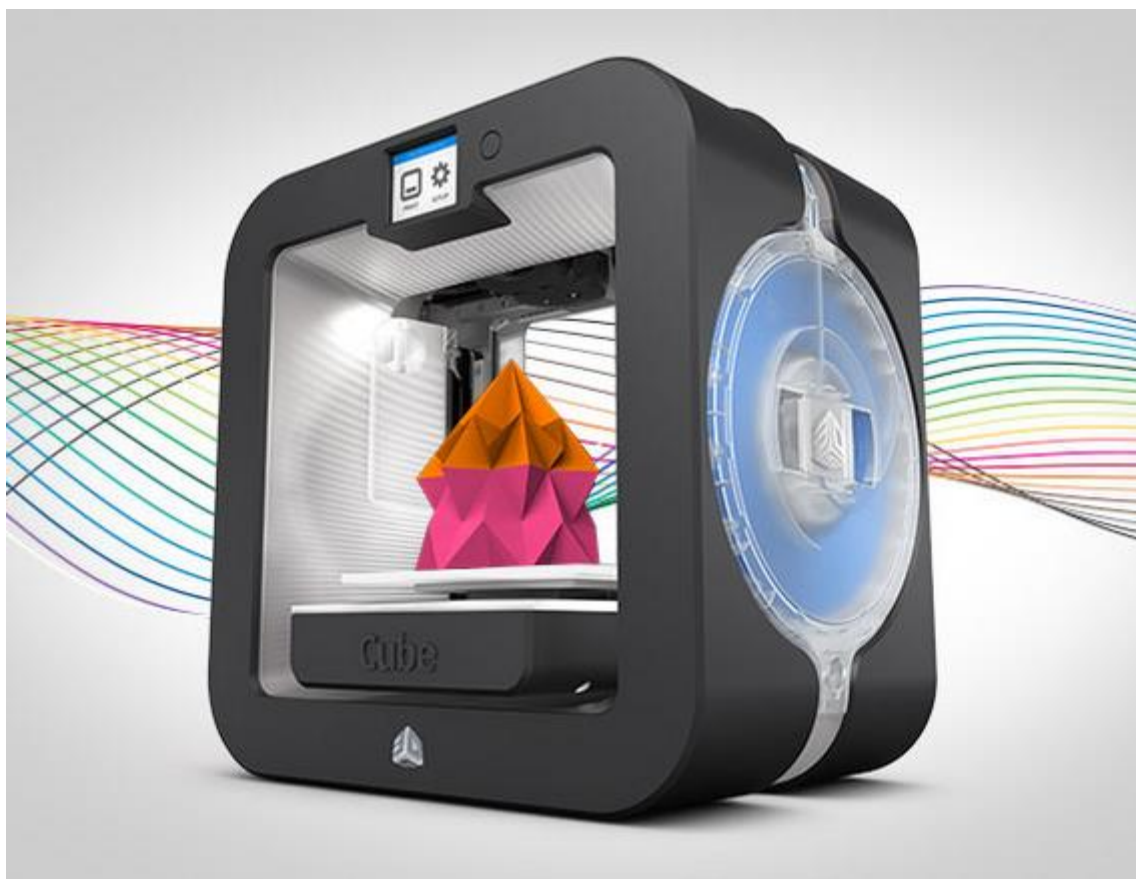
Trenutna ponuda uređaja na tržištu je velika, neki od njih će biti prikazani dalje u tekstu, a biti će podjeljeni prema tvrtkama koje ih proizvode.

### 5.1 3D Systems

Jedna od najvećih svjetskih tvrtki koja se bavi aditivnim tehnologijama. Osnovana je 1986. godine u SAD-u. Tvrtka između ostalog u ponudi ima i uređaje za aditivnu proizvodnju među kojima su najpoznatiji modeli *Cube 3* i *Cube Pro* koji se temelje na ekstrudiranju materijala.

**Cube 3:** Niskobudžetni uređaj koji je prvenstveno namjenjen za korištenje u kućanstvu. Odlikuje se modernim dizajnom te malim dimenzijama. Ima dvije mlaznice te je moguće izrađivati modele u dvije boje, a s jednim punjenjem se može izraditi 12-14 modela srednje veličine.

- Cijena: 989 eura
- Dimenzije: 335x343x241 mm
- Masa: 7,7 kg
- Maksimalna veličina modela: 152,5x152,5x152,5 mm
- Materijali koje koristi uređaj: ABS i PLA
- Debljina sloja za printanje: 70 µm, a prilikom brze izrade 200 µm.[12]



Slika 5.1 Cube 3 [12]

**Cube Pro:** Kao i Cube 3 spada u niskobudžetne uređaje. Ima najveću radnu podlogu od uređaja ove klase. Postoje 3 izvedbe ovog printera: Cube Pro (jedna mlaznica), Cube Pro Duo (dvije mlaznice) i Cube Pro Trio (tri mlaznice). Dizajnom je sličan Cube 3 uređaju, a ima zatvorenu radnu komoru.

- Cijena: između 2 399 i 3 499 eura ovisno o broju mlaznica
- Dimenzije: 578x591x578 mm
- Masa: 41-44 kg
- Maksimalna veličina modela: 285,4x230x270,4 mm za uređaj s jednom mlaznicom, 242,9x230x270,4 mm za uređaj s dvije mlaznice, 200,4x230x270,4 mm za uređaj s tri mlaznice
- Materijali koje koristi uređaj: PLA i ABS
- Debljina sloja printanja: 70  $\mu\text{m}$  (visoka rezolucija), 200  $\mu\text{m}$  (standardna rezolucija) i 300  $\mu\text{m}$  prilikom brze izrade.[12]

## 5.2 MakerBot

Makerbot je tvrtka osnovana u siječnju 2009. godine u New Yorku. Danas je jedna od vodećih svjetskih tvrtki što se tiče proizvodnje 3D printera s više od 50 000 3D printera u svijetu. Specifična je i po tome što se koncentrira na proizvodnju uređaja koji su prvenstveno namijenjeni za osobnu uporabu. Ponuda proizvoda koje nude su: *Replicator*, *Replicator Mini*, *Replicator 2X* te *Replicator Z18*. [13]

**Makerbot Replicator Mini:** Najjeftiniji i najmanji uređaj u ponudi Makerbota. Uređaj je opremljen kamerom rezolucije 320x240 mm te ima jednu mlaznicu.

- Cijena: 1 599 eura
- Dimenzije: 310x295x381 mm
- Masa: 8 kg
- Maksimalna veličina modela: 100x100x125 mm
- Debljina: 200 µm
- Materijal kojeg koristi: PLA. [13]



Slika 5.2 Makerbot Replicator Mini [13]

**Makerbot Replicator 2X:** Uređaj je pušten u prodaju u rujnu 2012. godine, a namijenjena mu je uloga eksperimentalne verzije uređaja Replicator 2. Uređaj je opremljen s dvije mlaznice a, specifičnost uređaja je i u tome što ima potpuno zatvoren prostor za printanje te ima grijanu aluminijsku podlogu.

- Cijena: 2 963,10 eura
- Dimenzije: 490x320x531 mm bez namota i 490x420x531 mm s namotom
- Masa: približno 12,6 kg
- Maksimalna veličina modela: 250x160x150 mm
- Debljuna sloja: 100  $\mu$ m
- Materijali kojeg koristi: ABS. [13]

**Makerbot Replicator:** 3D printer 5. generacije opremljen je kamerom, kako bi se lakše motrilo printanje. Kamera automatski slika konačni proizvod i sprema na tvrdi disk. Uređaj također automatski prepoznaje kada je materijal potrošen te pauzira printanje. Podloga za printanje je staklena

- Cijena: 3 320,10 eura
- Dimenzije: 528x441x410 mm
- Masa: približno 16 kg
- Maksimalna veličina modela: 252x199x150 mm
- Debljina sloja: 100  $\mu$ m.
- Materijal kojeg koristi: PLA. [13]

**Makerbot Replicator Z18:** Najveći i najskuplji uređaj u ponudi tvrtke Makerbot. Kao i Replicator ovaj uređaj je također 5. generacija 3D printera te je opremljen kamerom i senzorima koji automatski prepoznaju kada je ponestalo materijala, kako bi pauzirali proces printanja. Uređaj ima potpuno zatvorenu grijanu komoru za printanje.

- Cijena: 7 688,59 eura
- Dimenzije: 493x565x854 mm
- Masa: 41 kg
- Maksimalna veličina modela: 305x305x457 mm
- Debljina sloja: 100  $\mu$ m
- Materijal kojeg koristi: PLA. [13]



### 5.3 Ultimaker

Ultimaker je Nizozemska tvrtka osnovana 2011. godine, koja se bavi aditivnim tehnologijama. Cilj tvrtke je izrađivati niskobudžetne 3D printere koji će moći izraditi djelove visoke kvalitete. Trenutno se u ponudi tvrtke nalaze uređaji *Ultimaker Original* te *Ultimaker 2*, a od travnja 2015. godine ponuda će se proširiti i na *Ultimaker 2 Go* i *Ultimaker 2 Extended*. [14]

**Ultimaker Original:** Prvi proizvod tvrtke Ultimaker. Pušten je u prodaju svega nekoliko mjeseci nakon što je osnovana tvrtka. Posebnost ovog modela je u tome, što ga se može modificirati prema potrebama korisnika. 2012. godine je nagrađen nagradom najbržeg i najpreciznijeg printera od strane časopisa MEKE Magazine.

- Cijena: 995 eura
- Dimenzije: 357x342x388 mm
- Maksimalna veličina modela: 210x210x205 mm
- Debljina sloja: 20  $\mu$ m
- Materijal kojeg koristi: PLA. [14]

U ponudi postoji i **Ultimaker Original+** verzija koja se razlikuje u tome što ima grijanu podlogu, te kao materijal za printanje koristi PLA, ABS, U-PET. Cijena Ultimaker Orginal+ je 1 195 eura. [14]

**Ultimaker 2:** Nasljednik Ultimaker Original-a, pušten je u prodaju u rujnu. Časopis MAKE Magazine mu je dodjelio nagradu „best open-architecture 3D printer of 2014“.

- Cijena: 1 895 eura
- Dimenzije: 357x342x388 mm.
- Maksimalna veličina modela: 230x225x205 mm
- Debljina sloja je 20  $\mu$ m
- Materijal kojeg koristi: PLA, ABS, U-PET. [14]

**Ultimaker 2 GO i Ultimaker 2 Extended:** Dva nova uređaja u ponudi tvrtke Ultimaker, na tržištu će se naći u travnju 2015. godine. Biti će izrađivani od najkvalitetnijih dijelova i materijala te bi trebali predstavljati sljedeći korak niskobudžetnih 3D printera. *Ultimaker 2 GO:* Cijena će biti 1 195 eura, dimenzije će mu biti 258x250x287,5 mm, maksimalna veličina modela će iznositi 120x120x115 mm, a materijal kojeg će koristiti će biti PLA. *Ultimaker 2 Extended:* Cijena će mu biti 2 495 eura, dimenzije: 357x342x488 mm, maksimalna veličina modela će iznositi 230x225x305 mm, a materijali koje će koristiti: PLA, ABS, U-PET. Debljina sloja će biti 20  $\mu$ m. [14]



Slika 5.3 Ultimaker 2, Ultimaker 2 GO i Ultimaker 2 Extended [14]

## 5.4 Solidoodle

Solidoodle je tvrtka koja proizvodi uređaje za aditivnu proizvodnju sa sjedištem u Brooklynu, New York. Tvrtku je osnovao Sam Cervantes u rujnu 2011. godine. Trenutno se u ponudi tvrtke nalaze četiri modela 3D printera i samo jedan model prelazi cijenu od 1 000 dolara. [15]

**Solidoodle Press:** Printer namijenjen za kućnu uporabu s grijanom podlogom. Ovaj model je osmišljen kako bi bio maksimalno jednostavan za uporabu. Dovoljno ga je izvaditi iz kutije i može se početi printati (*e. plug-and-play machine*). Idealna za korisnike koji se prvi puta susreću s 3D printanjem.

- Cijena: 599 USD
- Dimenzije: 381x391x488 mm
- Maksimalna veličina modela: 203x203x203 mm
- Debljina sloja: 100  $\mu$ m
- Materijal kojeg koristi: ABS, PLA. [15]

**Solidoodle 4:** 3D printer 4. generacije s grijanom podlogom. Uređaj ima zatvoren radni prostor te prozirna vrata kako bi se mogao promatrati proces printanja.

- Cijena: 599 USD
- Dimenzije: 343x356x381 mm
- Maksimalna veličina modela: 203x203x203 mm
- Debljina sloja: 100  $\mu$ m
- Materijal kojeg koristi: ABS, PLA. [15]



Slika 5.4 Solidoodle 4 [15]

**Solidoodle Workbench Apprentice:** Manja verzija 3D printera iz Workbench serije. Ima dvije mlaznice te grijanu staklenu podlogu.

- Cijena: 799 USD
- Dimenzije: 338x384x356 mm
- Masa: 9kg
- Maksimalna veličina modela: 152x152x203 mm
- Debljina sloja: 100  $\mu$ m
- Materijal kojeg koristi: ABS, PLA. [15]

**Solidoodle Workbench:** Najveći i najskuplji uređaj u ponudi Solidoodla. Uređaj je opremljen s dvije mlaznice, grijanom staklenom podlogom. Velikog je volumena i otvorenog okvira.

- Cijena: 1 299 USD
- Dimenzije: 533,4x497,8x477,5 mm
- Masa 13,6 kg
- Maksimalna veličina modela: 304,8x304,8x304,8 mm
- Debljina sloja: 100  $\mu$ m
- Materijal kojeg koristi: ABS, PLA. [15]

## 5.5 Stratasys

Stratasys je vodeća tvrtka u svijetu aditivne tehnologije. Tvrtka je osnovao Scott Crump 1989. godine koji je i patentirao FDM postupak, a svoj prvi proizvod je tvrtka prodala u travnju 1992. godine. Ponuda sadrži od niskobudžetnih printera do naprednih 3D proizvodnih sustava. Iz velikog izbora uređaja koje nudi ova tvrtka, cijenom najpristupačniji su oni iz Idea serije koji su prvenstveno namijenjeni privatnim korisnicima. Uz Idea seriju uređaja tvrtka nudi još tri serije: *Design Series*, *Production Series* i *Dental Series*. Uređaji iz Design serije nude balans cijene i kvalitete između Idea i Production serije, dok su uređaji iz Production serije namijenjeni za industrijsku uporabu, a cijena im dostiže i nekoliko stotina tisuća dolara. Uređaji iz Dental serije su namijenjeni za sve koji se bave stomatologijom, od malih zubarskih ordinacija do velikih stomatoloških laboratorija. [16]

**Mojo:** Najmanji i najjeftiniji uređaj za 3D printanje u seriji. Odlikuje ga tihi rad, velika brzina izrade djelova te male dimenzije. Uređaj koristi dvije mlaznice, jednu za izradu djela, a drugu za izradu potporne strukture). Za otklanjanje potporne strukture koristi se sustav Wave Wash 55.

- Cijena: 6000 USD
- Dimenzije: 630x450x53 mm
- Masa: 27 kg
- Maksimalna veličina modela: 127x127x127 mm
- Debljina sloja: 178  $\mu\text{m}$
- Materijal kojeg koristi: ABS (9 različitih boja). [16]



Slika 5.5 Stratasys Mojo [16]

**uPrint SE i uPrint SE Plus:** Sljedeći uređaji u ponudi iz Idea serije. Veći su od Mojo uređaja, ali se cijenom već nemogu smatrati niskobudžetnim uređajima. Cijena im se kreće od 15 900 USD za uPrint SE do 18 769 USD za uPrint SE plus. Uređaji imaju dimenzije 635x660x940 mm, a maksimalna veličina izratka kojeg može izraditi uPrint SE je 203x152x152 mm, a Uprint SE Plus 203x203x152 mm. Debljina sloja za printanje je 254  $\mu\text{m}$ , a u uPrint SE Plus postoji mogućnost odabira i debljine od 330  $\mu\text{m}$ . Razlika između ova dva uređaja je i u mogućnosti odabira 9 različitih boja za printanje na uPrint SE Plus uređaju. Materijal kojeg koriste je ABS. Za otklanjanje potporne strukture koristi se sustav Wave Wash. [16]

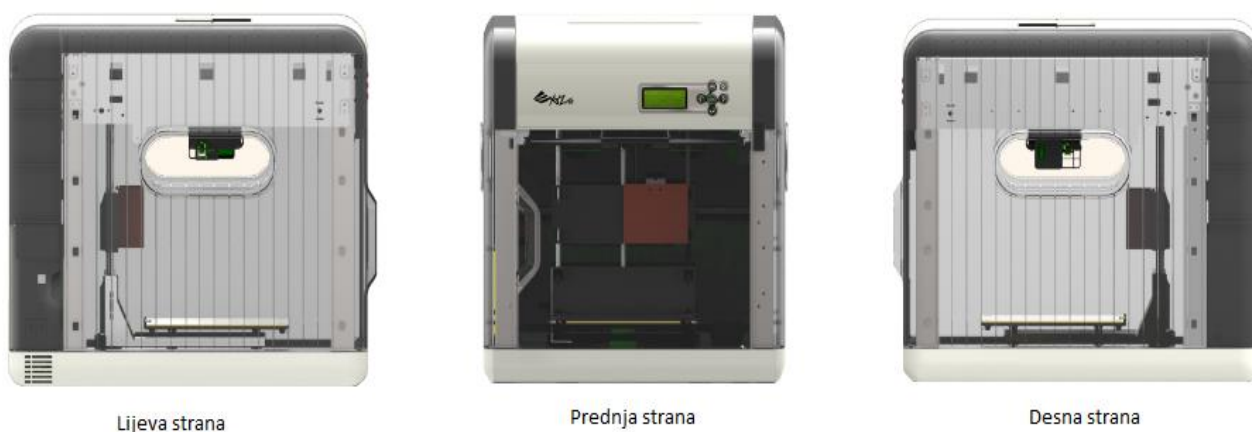
## 5.6 Ostali

**Makergear M2:** Treća generacija 3D pisača Američke tvrtke Makergear. Odlikuje ga velika preciznost, a načinjen je od čeličnog okvira što pridonosi robusnosti, kako nebi bio podložan utjecajima okoline.

- Cijena: 1 775 USD
- Dimenzije: 558,8x482,6x508 mm
- Masa: 12,7 kg
- Maksimalna veličina modela: 203,2x254x203,2 mm
- Debljina sloja: 25  $\mu\text{m}$
- Materijal kojeg koristi: ABS, PLA. [17]

**da Vinci 1.0:** Proizvod tvrtke XYZprinting koja je dio grupacije Kinpo Grup sa sjedištem u Tajvanu. Proizvod se odlikuje niskom cijenom i jednostavnom uporabom. Materijal se lako zamjenjuje, a bitna odlika je i ta što ima zatvorenu radnu komoru.

- Cijena: 499,99 USD
- Dimenzije: 468x510x558 mm
- Maksimalna veličina modela: 200x200x200 mm
- Debljina sloja: 100, 200, 300 i 400  $\mu\text{m}$  ovisno o brzini izrade
- Materijal kojeg koristi: ABS. [18]



Slika 5.6 da vinci 1.0 [18]

**Robo 3D R2 i Robo 3D R2 Mini:** Novi proizvodi Američke tvrtke Robo 3D. Ova dva modela su veća i manja verzija dosadašnjeg proizvoda R1. Jedna od najvećih odlika ovih printera je u tome što mogu printati velik broj materijala uključujući PLA, ABS kao i kompozitne materijale poput PLA pomješan s broncom ili drvom. R2 za razliku od R2 mini ima drugu mlaznicu koja omogućuje printanje u dvije boje ili čak dva različita materijala.. Na tržištu bi se trebali naći u ljeto 2015. godine. Cijena će im se kretati oko 1500-1800 USD za R2 i 500-600 USD za R2 Mini. Maksimalna dimenzija koju može izraditi R2 je 254x254x254 mm, R2 mini 114,3x114,3x114,3 mm. Debljina sloja iznosi 100 µm. [19]

## 6.) MATERIJALI

Prilikom postupka taložnog očvršćivanja najčešće se upotrebljavaju amorfni materijali. Amorfni materijali nemaju točno definirano talište, omekšavaju i viskoznost se snizuje povišenjem temperature. Viskoznost pri kojoj se amorfni polimeri mogu ekstrudirati pri određenom tlaku je dosta visoka i omogućuje zadržavanje oblika nakon ekstrudiranja i brzo očvršćivanje. Amorfni se materijali također koriste i zato, što se novi sloj dobro spaja s prethodnim. [1]

Najčešće korišteni polimer za taložno očvršćivanje je ABS (*akrilonitril/butadien/stiren*) te njegove varijacije. Uz ABS koriste se i drugi materijali poput: PC (*polikarbonat*), ASA (*akrilonitril/stiren/akrilat*), PPSF/PPSU (*poli(fenilen-sulfon)*), PLA (*poliaktidna kiselina*) ULTEM, PE-HD, PE-LD, PET i drugi.

**ABS (*akrilonitril/butadien/stiren*):** Mješavina amornog plastomera koji se sastoji od 15-35 % akrilonitrila ( $C_3H_3N$ ), 5-30 % butadiena ( $C_4H_6$ ) i 40-60% stirena ( $C_8H_8$ ). Svojstva pojedinih sastojaka daju karakteristike ABS materijalu. Akrilonitril je toplinski i kemijski postojan, butadien daje duktilnost i savojnu žilavost, a stiren sjajnu površinu te omogućuje lakšu obradu materijala i nižu cijenu. [1]

U slučaju miješanja različitih sastojaka moguće je dobiti materijal različitih svojstava. Tvrtka Stratasys u ponudi ima pet različitih tipova ABS materijala. ABS plus koji nudi najveću ponudu boja dostupnu s FDM tehnologijom. Dijelovi isprintani u ovom materijalu imaju dobra mehanička svojstva i postojanost. ABSi čiji dijelovi su prozirni te omogućavaju prolazak svjetlosti (žmigavci, svijetla). Koriste se u automobilskoj i medicinskoj industriji. ABS-M30 je 25-70 % snažniji od standardnog ABS-a te je idealan za izradu prototipova. Povezivanje slojeva je znatno bolje nego kod klasičnog ABS-a. ABS-M30i je materijal visoke čvrstoće pogodan za medicinsku i farmacijsku industriju te za pakiranje hrane. ABS-ESD7 je materijal koji se primjenjuje u slučajevima kada statički naboj može oštetiti proizvod. Idealn je za elektroničke proizvode. [20]



**PLA (*polilaktidna kiselina*):** Biorazgradivi plastomer koji se dobiva iz kukuruza i šećerne trske što ga čini ekološki najprihvatljivijim materijalom. Neželjeni predmeti izrađeni od PLA materijala se mogu jednostavno ostaviti na zemlji gdje će se prirodno razgraditi. Prikladan je za printanje pri niskim temperaturama što smanjuje rizik od vitoperenja materijala. [18]

**PC (*polikarbonat*):** Pravi industrijski plastomer. Zbog svojih svojstava ima široku primjenu. Koristi se za izradu ambalaže u prehrambenoj industriji te u automobilskoj, zrakoplovnoj, medicinskoj te mnogim drugim industrijama. PC nudi visoku preciznost, izdržljivost te stabilnost dijelova. Čvrstoća mu je viša 60-80 % od PC-a upotrebljavanog u postupcima injekcijskog prešanja. Kemijski su postojani prema atmosferilijima. U ponudi tvrtke Stratasys postoji i varijanta PC-ISO koja se odlikuje većom čvrstoćom, otpornosti na povišenu temperaturu te biokompatibilnošću. [1,20]



Slika 6.1 PC aparat za tople napitke [1]

**PC-ABS:** Najčešće korišteni industrijski plastomer. Nastao je miješanjem polikarbonata i ABS-a te nudi željena svojstva oba materijala. Njome se dobiva čvrstoća i postojanost pri visokim temperaturama PC-a te savitljivost ABS-a. Ima odlična toplinska i mehanička svojstva i značajno je čvršći od ABS-a. Koristi se u automobilskoj industriji te u elektronici i komunikacijama. [20]

**PPSF/PPSU (*poli(fenilen-sulfon)*):** Materijal s najvišom toplinskom otpornošću od svih FDM plastomernih materijala. Ima dobra mehanička svojstva, te ima odličnu kemijsku postojanost, otporan je na benzin i otapala. Dijelovi izrađeni od ovog materijala, ne samo da su toplinski i kemijski postojani, nego omogućuju visoku dimenzijsku preciznost. Koriste se u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji te u medicini. [20]



Slika 6.2 PPSF kućište zupčanika [1]

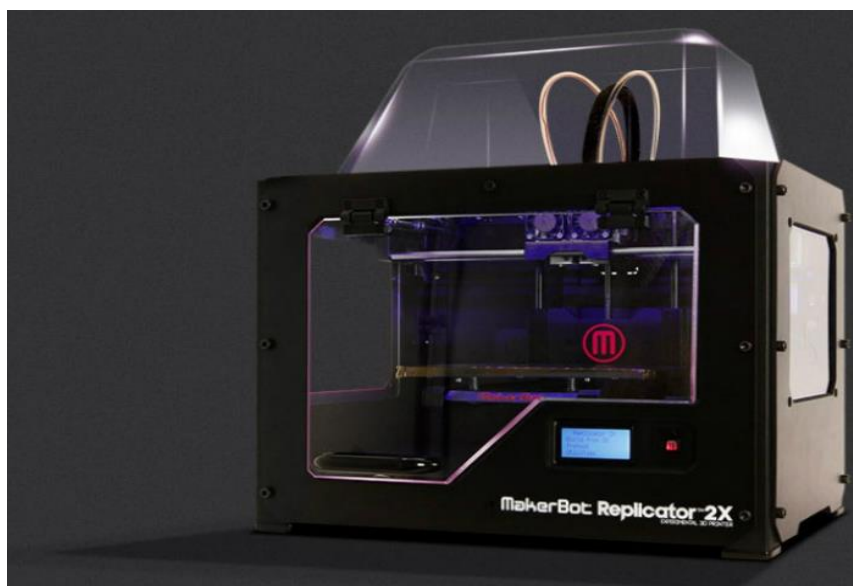
**PEI (*polieterimid*):** Materijal odličnih kemijskih i toplinskih svojstava. Industrijski naziv za PEI je ULTEM. Tvrtka *Stratasys* u ponudi ima ULTEM 1010 koji je pogodan za korištenje u prehrambenoj te medicinskoj industriji. Drugi PEI u ponudi tvrtke *Stratasys* je ULTEM 9085 koji je idealan za korištenje u transportnoj industriji zbog visokog omjera čvrstoće i mase te zbog svoje otpornosti prema plamenu, dimu i toksičnim tvarima. [20]

## 7.) PRIONJIVOST MODELA NA RADNU PODLOGU

Prilikom izrade modela na niskobudžetnim 3D printerima dolazi do pojave podizanja uglova modela od podloge tj. do loše prionjivosti što rezultira škartom. Ova se pojava najčešće pojavljuje na većim tvorevinama, koje zauzimaju čitavi prostor radne podloge, te imaju ravno dno i pravokutan oblik.

U nastavku će biti opisan utjecaj jednog od najvažnijih parametara aditivne tehnologije na ovu pojavu, a to je temperatura radne podloge.

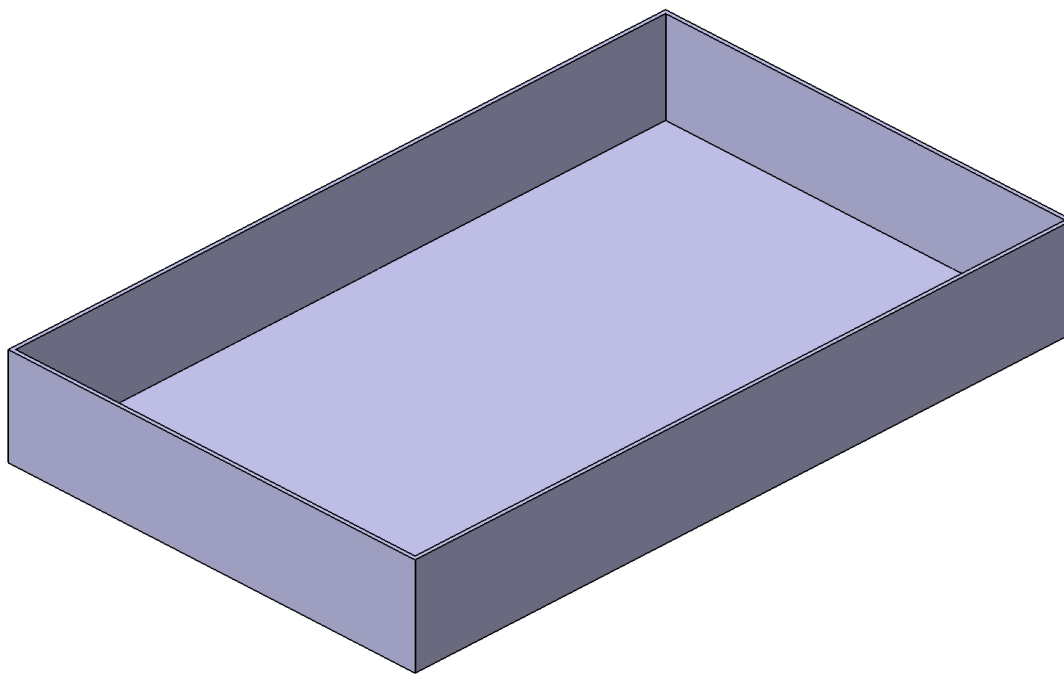
Uređaj na kojem se radilo ispitivanje je Makerbotov Replicator 2X koji koristi tehnologiju taložnog očvršćivanja za izradu modela. Korišteni softver pri izradi modela je Makerware tvrtke Makerbot. Makerware omogućava uvid u radni prostor uređaja te manipulaciju položaja i veličine modela kojeg će se izrađivati. U Makerwareu se također mogu podešavati parametri izrade tvorevine kao što su odabir vrste materijala, brzina izrade, temperatura radne podloge i sl. Također se prije same izrade mogu provjeriti predviđeno vrijeme izrade te broj slojeva potrebnih za izradu tvorevine. Materijal korišten za izradu modela je ABS.



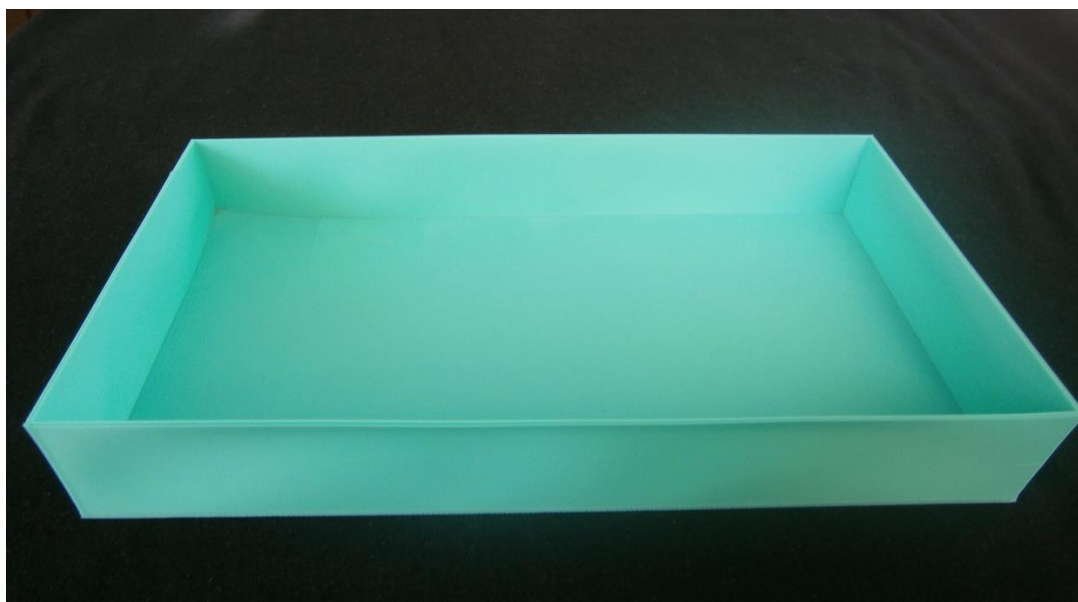
Slika 7.1 Makerbot Replicator 2X [13]

## 7.1 Veći model

Prvi model koji se izrađivao je bila pravokutna kutija dimenzija 210x130x35 mm. Debljina stijenke na dnu je 2 mm, a na bočnim ploham 1,2 mm.



Slika 7.2 model

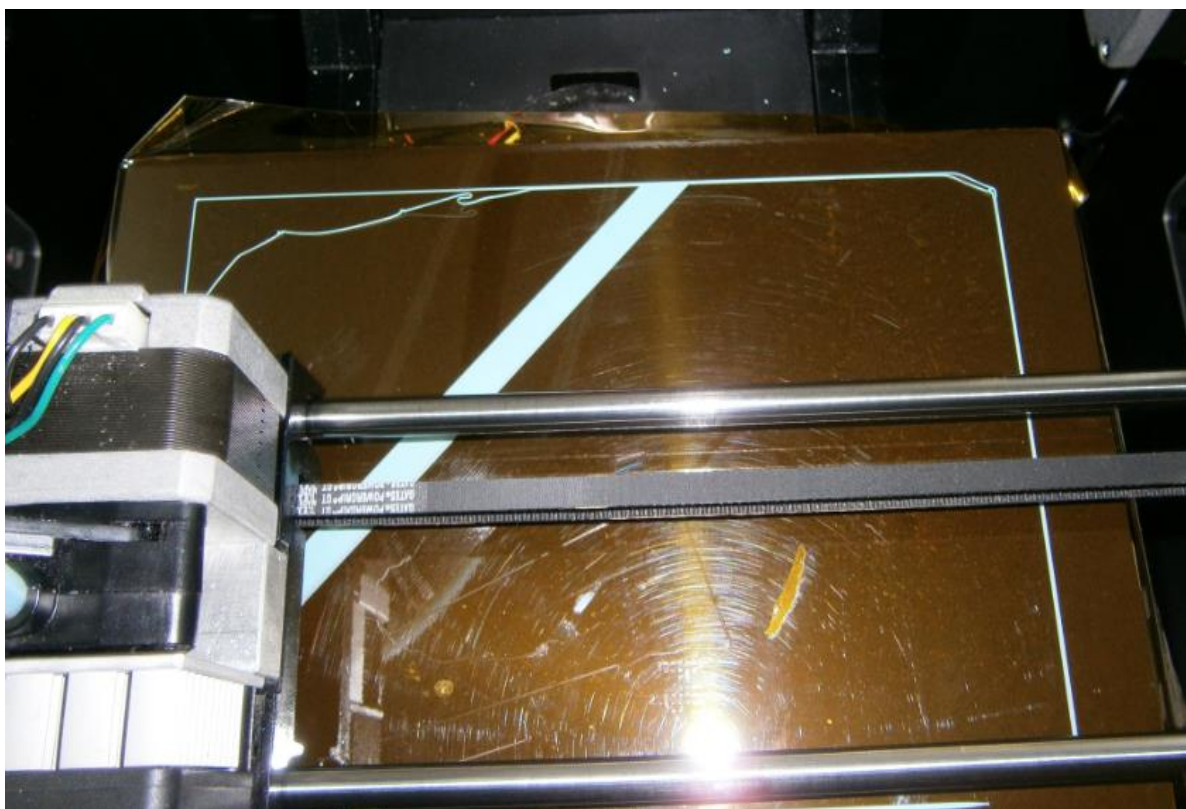


Slika 7.3 Izradak

Prije početka izrađivanja modela potrebno je prvo zagrijati radnu podlogu. Nakon što se radna podloga zagrije ostavlja se pri toj temperaturi 30-45 min. Razlog zašto se radna podloga ostavlja ugrijava 30-45 min je kako bi se maksimalno deformirala te kako bi se spriječile kasnije

deformacije podloge, a samim time i greške na modelu. Nakon što se radna podloga ostavi dovoljno dugo zagrijana slijedi kalibriranje. Kalibriranje se izvodi u sedam točaka, tri unutarnje, tri vanjske te jedna na sredini radne podloge. Udaljenost radne podloge od mlaznica mora biti dovoljno velika kako bi između njih mogao proći papir. Nakon što se izvrši kalibriranje u Makeware softveru se određuju parametri izrade te se može krenuti s printanjem.

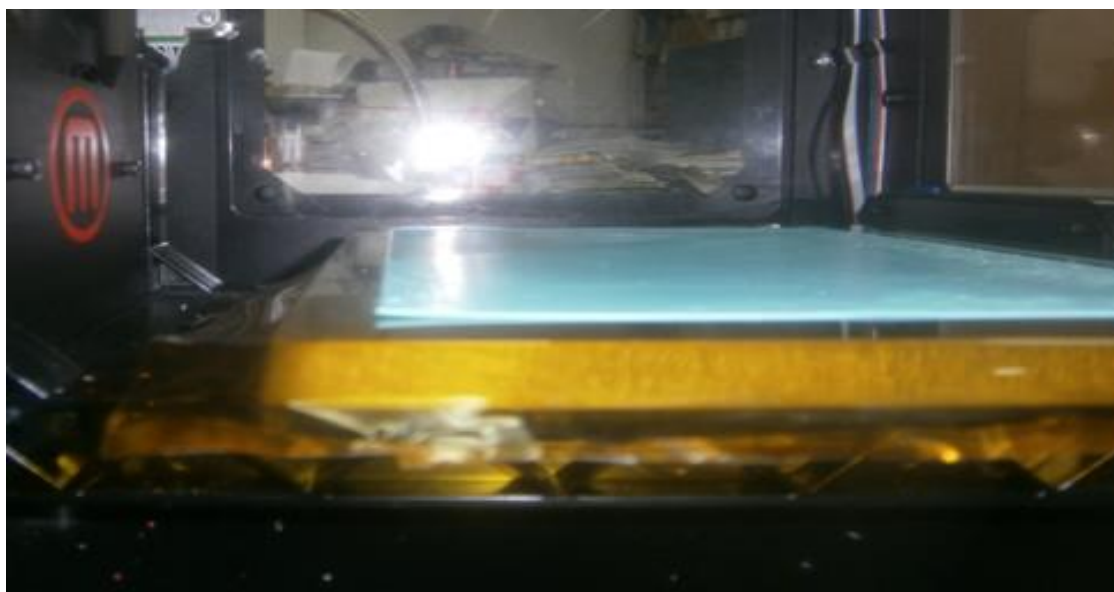
Prilikom printanja prvog izratka korištena je temperatura radne podloge od 100°C. Temperatura ekstrudera je iznosila 230°C. Već prilikom nanošenja vanjske konture su se pojavile nepravilnosti jer nit ABS-a nije dobro prijanjala uz podlogu. Nepravilnosti su se pojavile u stražnjim kutovima radne podloge, što je ukazivalo na razliku u temperaturi između pojedinih dijelova radne podloge.



Slika 7.4 Nepravilnosti prilikom nanošenja materijala

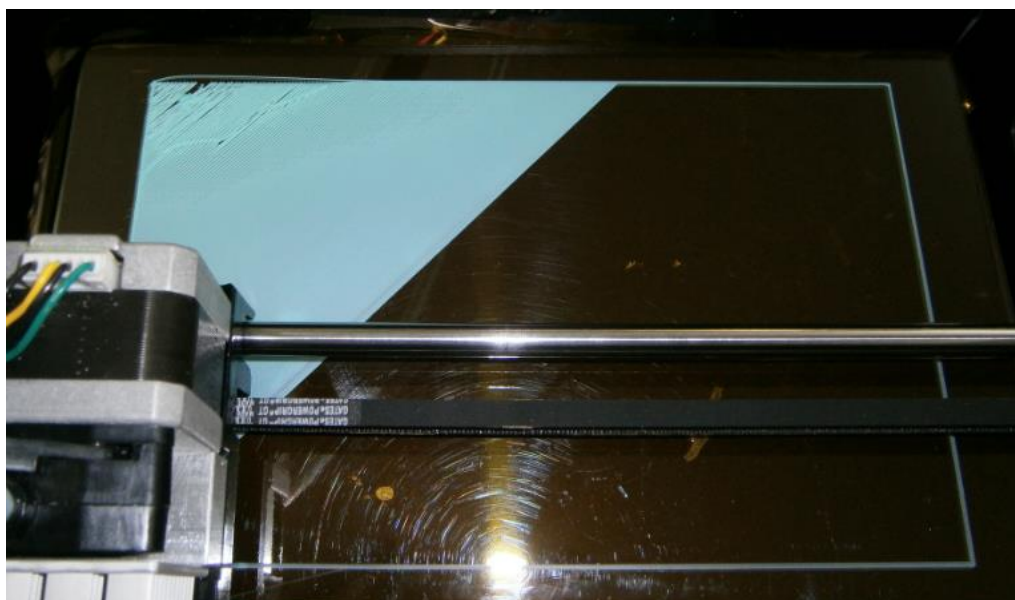
Također su se nepravilnosti pojavile i prilikom izrade prvog sloja modela, ali nije bilo odljepljivanja izratka od radne podloge. Odljepljivanje izratka od radne podloge je počelo nakon izrade drugog sloja, prvo se odvojio stražnji lijevi kraj. Nakon odvajanja postupak je zaustavljen te se krenilo s izradom pri drugim parametrima.





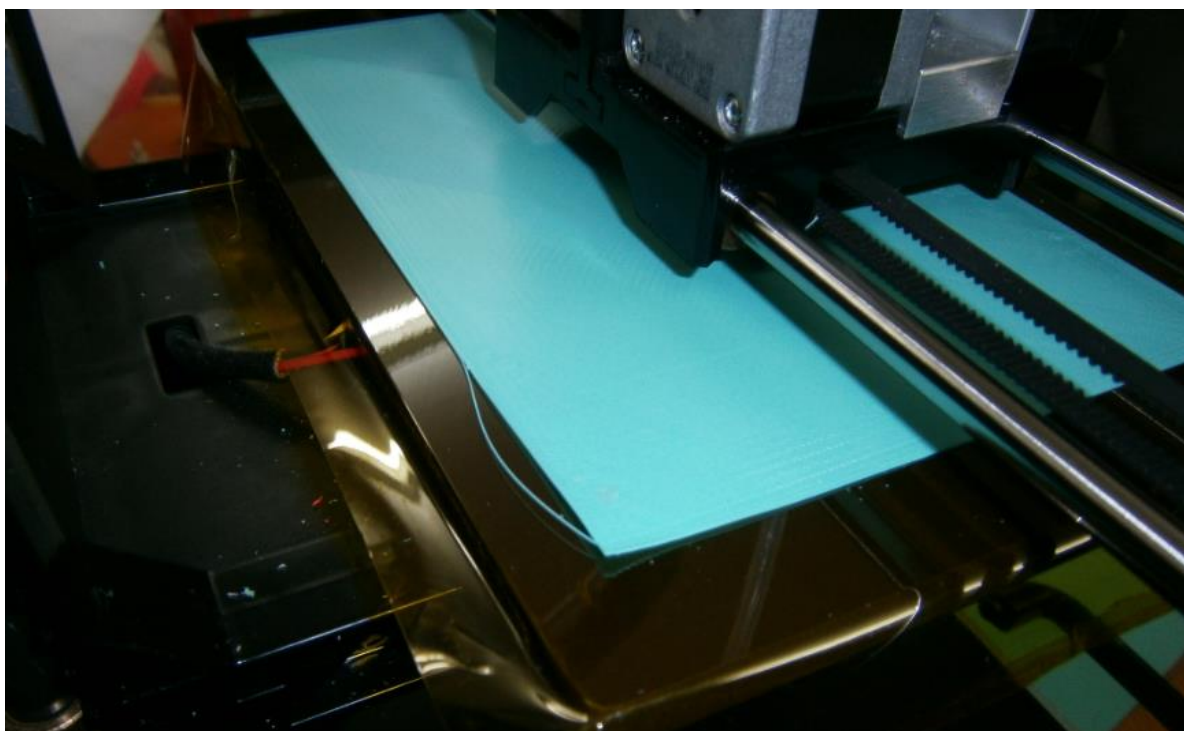
Slika 7.5 Početak odvajanja prvog izratka od radne podloge (slikano s lijeve strane uređaja)

Drugi izradak je izrađivan pri temperaturi radne podloge od 105°C. Temperatura ekstrudera je kao prvom slučaju bila 230°C. Za razliku od prvog printanja, prilikom drugog printanja nije bilo pojave nepravilnosti u izradi konture, ali se nepravilnost pojavila prilikom izrade prvog sloja u stražnjem lijevom kutu radne podloge.



Slika 7.6 Nepravilnosti u stražnjem lijevom kutu pri izradi prvog sloja

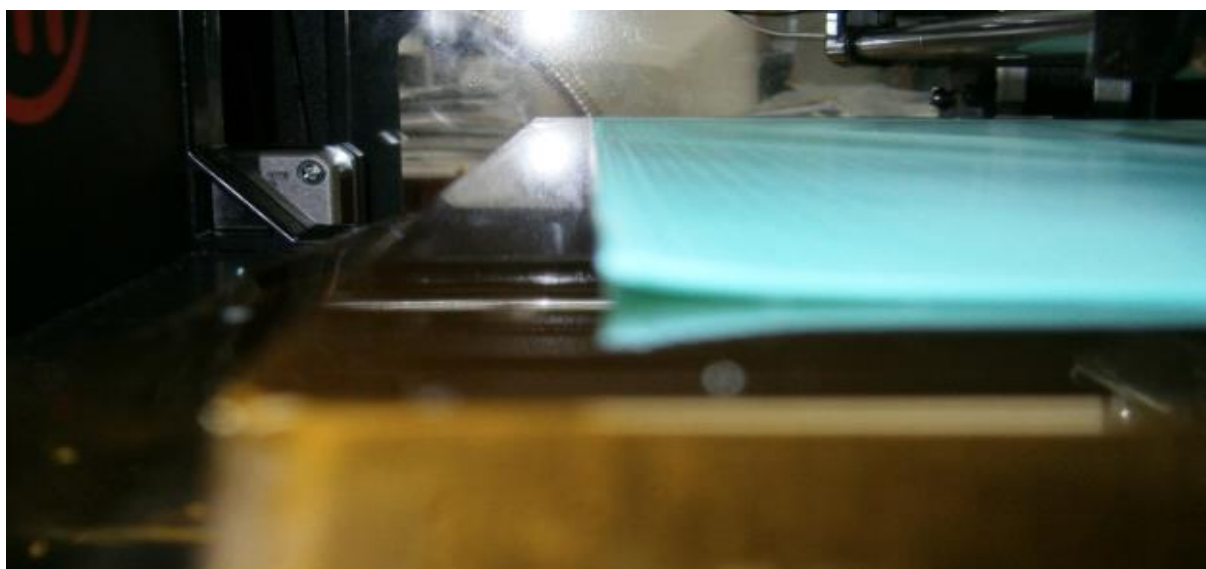
Model se počeo odvajati od podloge prilikom izrade trećeg sloja. Kao što je to bio slučaj i kod izrade prvog modela i ovdje se podiga o stražnji lijevi kraj.



Slika 7.7 Početak odvajanja modela od radne podloge pri 105°C

Kod trećeg i četvrtog printanja korištene su temperature radne podloge 110°C i 115°C.

Temperatura ekstrudera je bila 230°C. Rezultati trećeg i četvrtog printanja modela si bili isti kao i prilikom drugog printanja. Modeli su se počeli odvajati od radne podloge prilikom izrade trećeg sloja. Odvajanje je počelo u stražnjem lijevom kutu radne podloge.

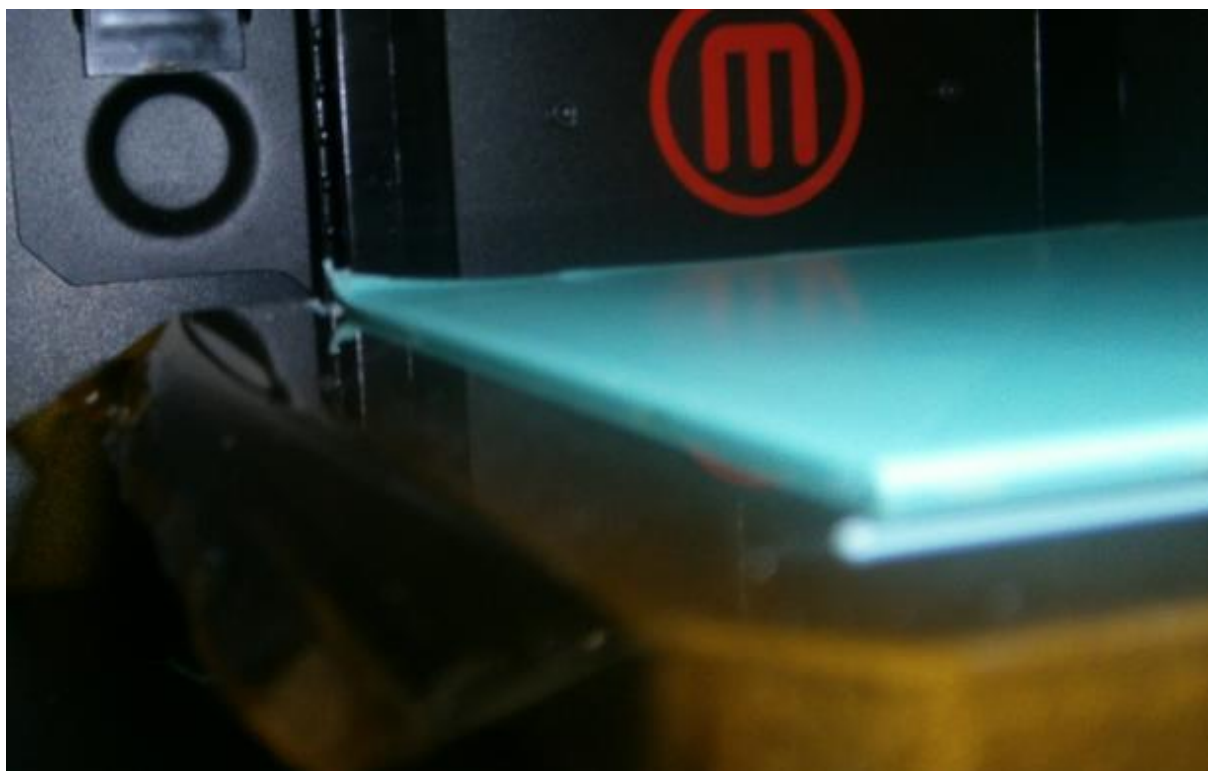


Slika 7.8 Odvajanje modela od podloge prilikom 3. printanja



Slika 7.9 Izradak isprintan pri temperaturi radne podloge od 115°C

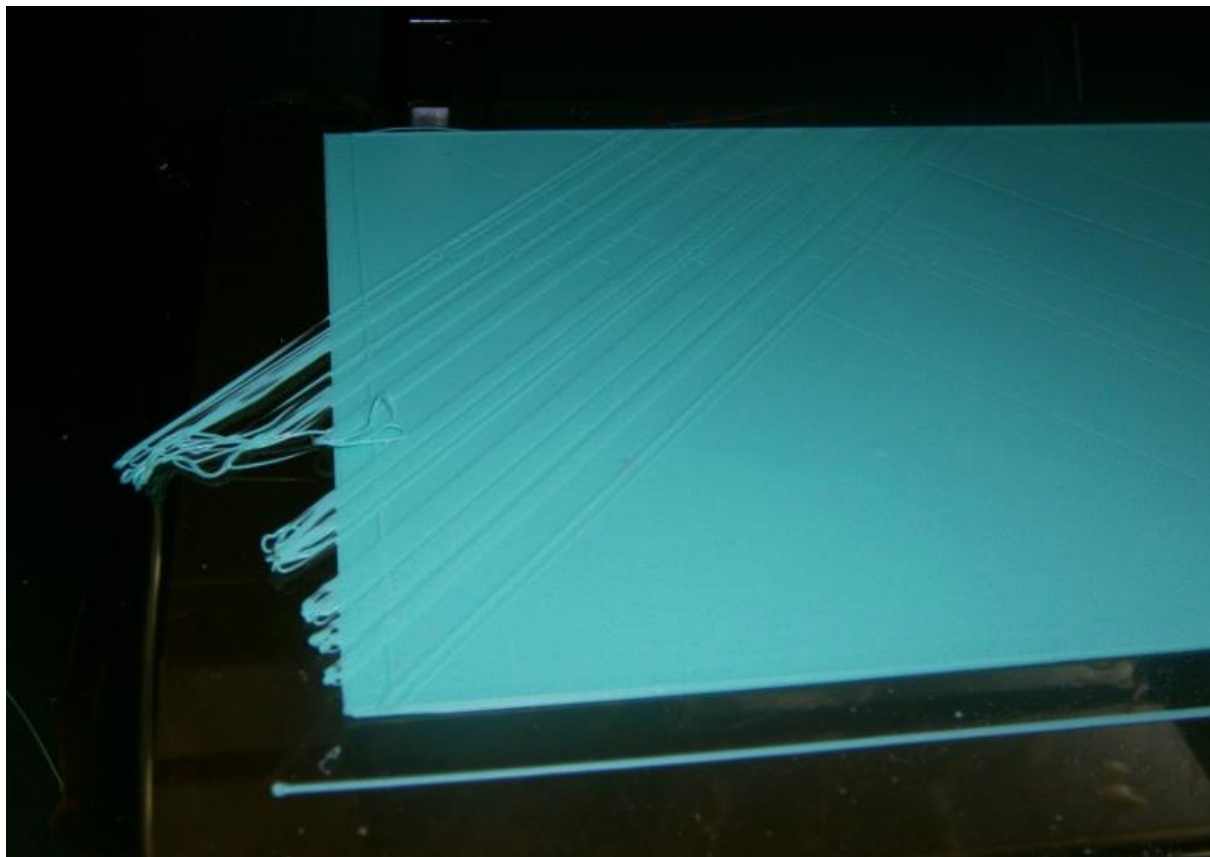
Prije petog printanja modela rađena je nova kalibracija uređaja zbog dodatne deformacije radne podloge uslijed konstantnog zagrijavanja. Temperatura radne podloge pri izradi je bila 120°C, dok je temperatura ekstrudera bila 230°C. Kao i kod prijašnjih izradaka došlo je do podizanja donje plohe modela u stražnjem lijevom kutu radne podloge.



Slika 7.10 Odljepljivanje modela pri temperaturi radne podloge od 120°C



Prilikom šestog printanja modela korištena je temperatura podloge od 125°C. Temperatura ekstrudera je bila 230°C. Pri temperaturi radne podloge od 125°C u stražnjem lijevom kutu nije došlo do odvajanja modela od radne podloge, ali je došlo do pojave razvlačenja niti materijala zbog previsoke temperature.

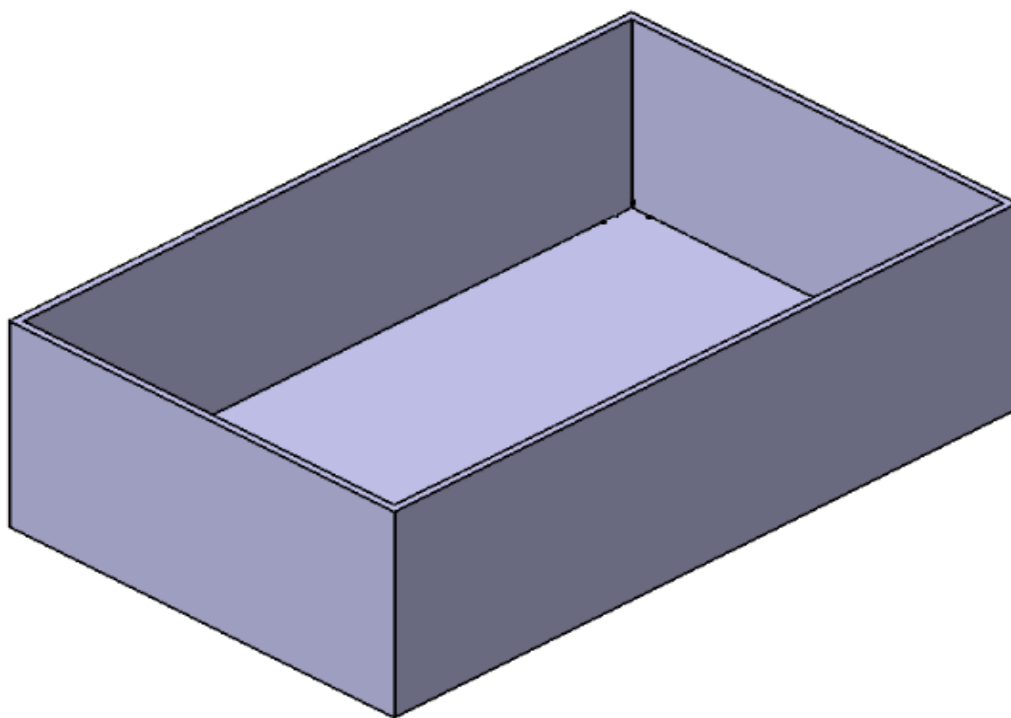


Slika 7.11 Razvlačenje niti materijala pri temperaturi radne podloge od 150°C

## 7.2 Manji model

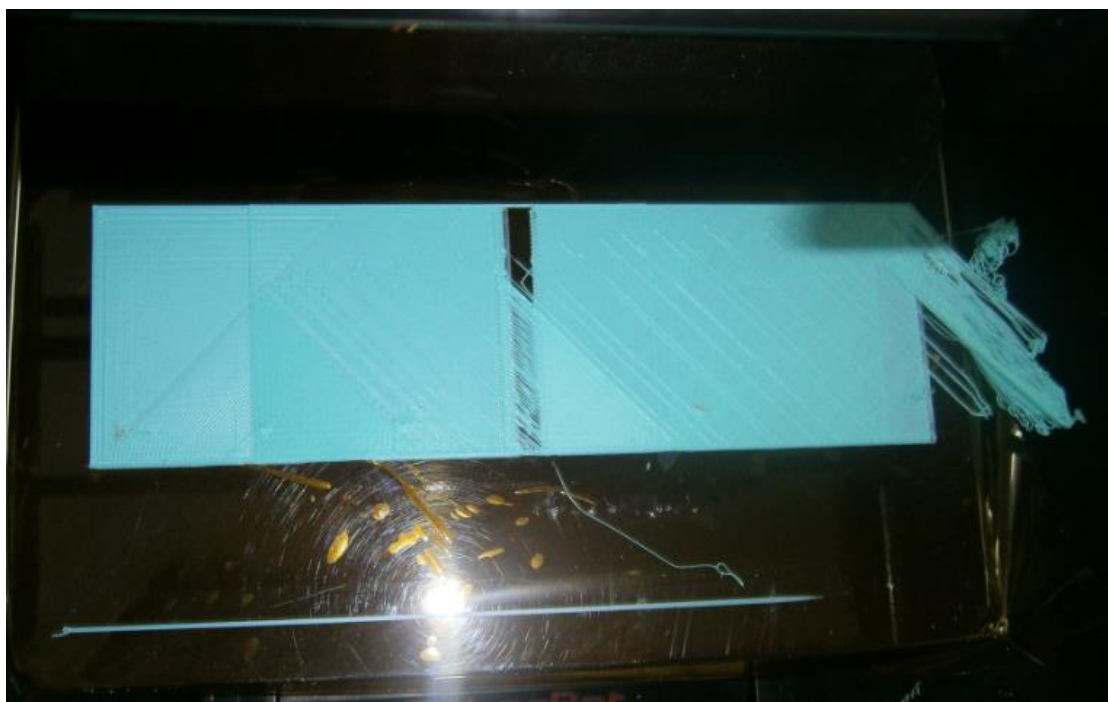
Nakon neuspješne izrade većeg modela unatoč promjenama temperature, za novo ispitivanje su promijenjene dimenzije modela te njegov položaj na radnoj podlozi. Nove dimenzije su iznosile 105x65x35 mm, debljina stijenki kao i materijal izrade su ostali isti.

Za prvo printanje je postavljena temperatura radne podloge na 115°C. Temperatura ekstrudera je bila 230°C. Izrađivana su dva modela u isto vrijeme, te su bili postavljeni na sredinu radne podloge.



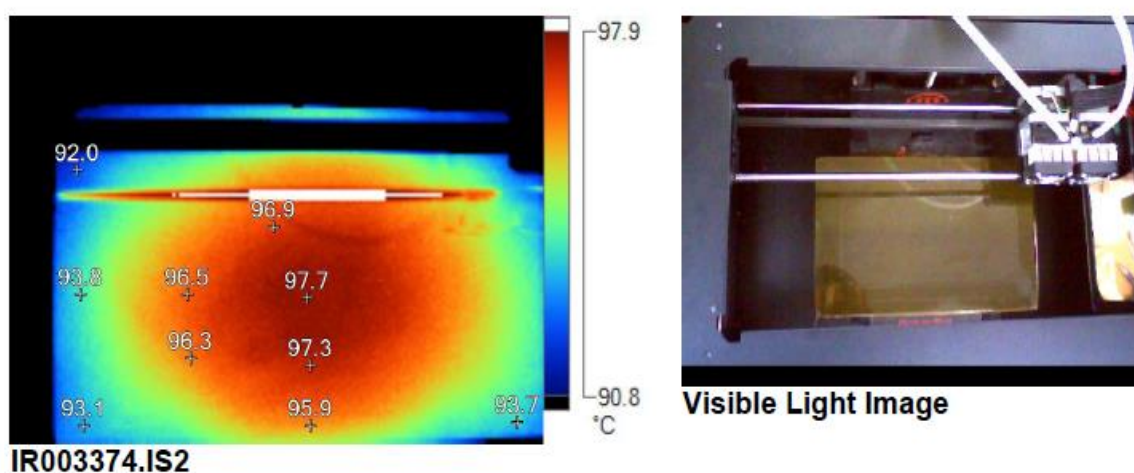
Slika 7.12 Novi model manjih dimenzija

Prilikom izrade pri navedenim parametrima nije se dogodilo odljepljivanje modela od radne podloge, ali je na desnom modelu došlo do pojave razvlačenja niti materijala. Do razvlačenja niti je došlo zbog previsoke temperature na tom dijelu radne podloge.



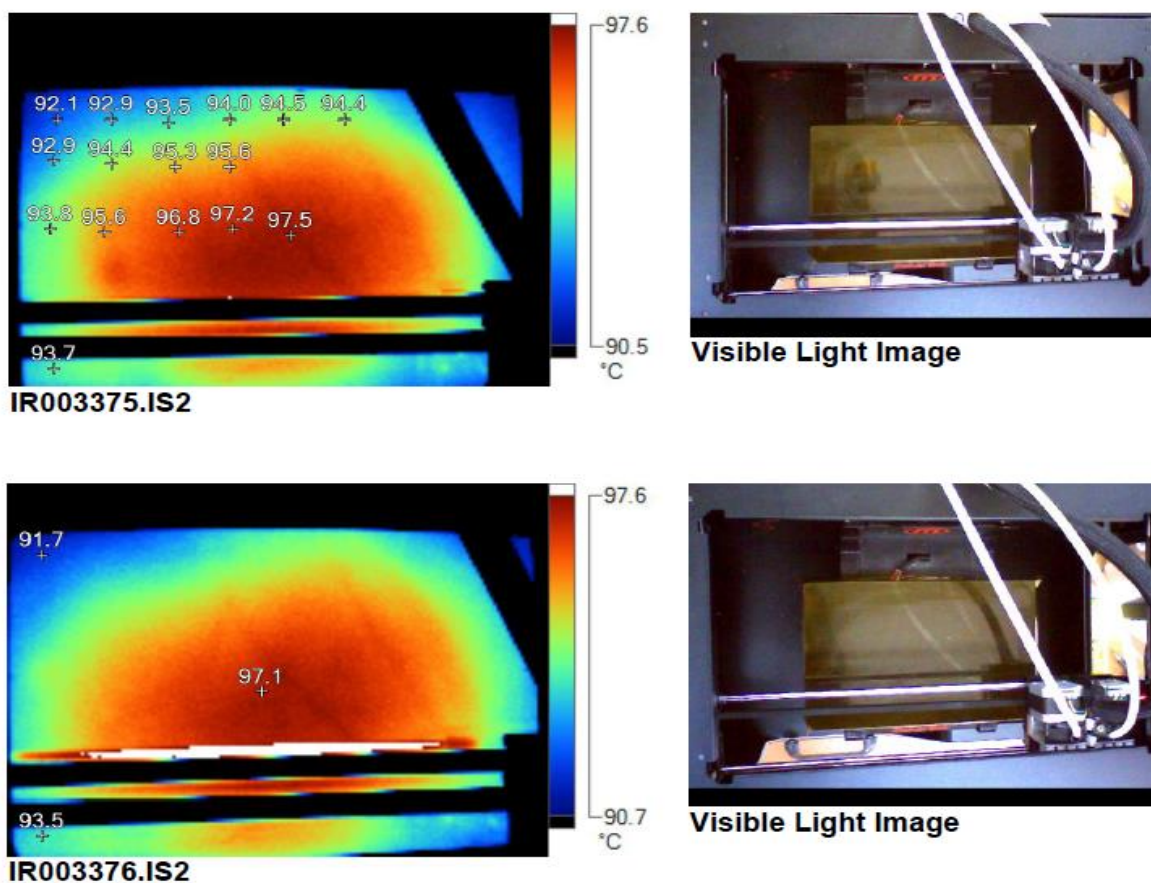
Slika 7.13 Razvlačenje niti materijala na desnom modelu

Razlog pojave svih nepravilnosti nastalih pri izradi modela je u tome što je nemoguće postići ujednačenu temperaturu radne podloge. Kao što je prikazano na slici 7.14. koja je slikana termokamerom, vidljiva je očita razlika u temperaturama na pojedinim dijelovima radne podloge.



Slika 7.14 Razlike u temperaturi na pojedinim dijelovima radne podloge

Na sredini radne podloge temperatura je najviše te postepeno pada kada se ide prema rubovima podloge. Razlike u temperaturi između središta i rubova u nekim djelovima prelaze 5°C što bitno utječe na prionjivost modela na radnu podlogu.



Slika 7.15 Razlike u temperaturi na pojedinim djelovima radne podloge

Na slici 7.15. je vidljivo da je temperatura radne podloge najniže na stražnjem lijevom kutu radne podloge. Rezultat toga je podizanjem modela od radne podloge baš na tom dijelu. Smanjenjem dimenzija modela te njegovim postavljanjem na središte radne podloge moguće je uspješno je izbjeći odljepljivanje.

## 8.) ZAKLJČAK

Aditivne tehnologije zauzimaju sve veći udio u današnjoj proizvodnji. One omogućuju izradu tvorevina od CAD modela do izratka u jednom koraku neovisno o kompliciranosti geometrije oblika. Ove tehnologije omogućuju znatnu uštedu vremena i novca jer izrada dijelova ne zahtijevaju uporabu kalupa, obradu odvajanjem čestica, oblikovanje deformiranjem itd.

Od mnogih vrsta aditivnih tehnologija za ovaj rad je najzanimljivija tehnologija taložnog očvršćivanja. Zbog svoje jednostavnosti te jednostavnosti izrade uređaja za taložno očvršćivanje posljednjih godina se pojavljuje sve više tvrtki koje se koncentriraju baš na ovu vrstu tehnologije što je rezultiralo velikim padom cijena uređaja, a samim time i rastom popularnosti ove tehnologije. Pojavom niskobudžetnih uređaja ova tehnologija postaje sve popularnija i za osobnu upotrebu u kućanstvima što je donedavno bilo nezamislivo te će se sve ovo sigurno pozitivno odraziti na njen razvoj i u budućnosti.

Prilikom izrade parametri imaju veliki utjecaj na svojstva modela kao što su točnost izrade ili kvalitetu površine. Utjecaj parametara je posebno naglašen na niskobudžetnim uređajima koji kvalitetom ipak zaostaju za profesionalnim uređajima namjenjenim proizvodnji. Jedna od učestalih grašaka koja se javlja na niskobudžetnim uređajima je i loša prionjivost modela na radnu podlogu u uglovima većih proizvoda pravokutnog oblika. U ovom radu je ispitan utjecaj parametara na taj problem te je uočeno je da razlog tome neravnomjerna temperatura radne podloge.

## 9.) LITERATURA

- 1.) Pilipović, A. : *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa*, doktorski rad, Zagreb, 2012.
- 2.) Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B. : *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, 2010.
- 3.) <http://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography>
- 4.) <http://www.custompartnet.com/>
- 5.) [http://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_sintering](http://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering)
- 6.) <http://www.3dprint.hr/aditivne-tehnologije/>
- 7.) Chua, C.K., Leong, K.F., Lim, C.S. : *Rapid prototyping: Principles and applications*, World Scientific Publishing, Singapur, 2003.
- 8.) Hopkinson, N., Hague, R.J.M., Dickens, P.M. : *Rapid Manufacturing: An industrial revolution for the digital age*, Wiley, 2006.
- 9.) Agarwala, M.K., Jamalabad, V.R. , Langrana, N.A., Safari, A., Whalen, P.J., Danforth, S.C. : *Structural quality of parts processed by fused deposition*, Rapid Prototyping Journal 2(1996)4, 4-19
- 10.) <http://www.print3drevolution.com/?p=1707>
- 11.) <http://www.gartner.com/newsroom/id/2887417>
- 12.) <http://cubify.com/en/Products>
- 13.) <http://eu.makerbot.com/en/products.html>
- 14.) <https://ultimaker.com/en/products>
- 15.) <http://www.solidoodle.com/index.php?route=common/home>
- 16.) <http://www.stratasys.com/3d-printers>
- 17.) <http://www.makergear.com/products/m-series-3d-printers>
- 18.) [http://us.xyzprinting.com/us\\_en/Product/da-Vinci-1.0](http://us.xyzprinting.com/us_en/Product/da-Vinci-1.0)
- 19.) <http://www.tomsguide.com/us/makerbot-cubify-kickstarter,news-20235.html>
- 20.) <http://www.stratasys.com/materials/fdm>

## **10.) PRILOZI**

1.) CD-R disc